



李瑞平,罗洋,隋鹏祥,王浩,刘武仁,郑金玉.黑土区不同秸秆还田方式对玉米产量及经济效益的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(02):67-81.

LI Ruiping, LUO Yang, SUI Pengxiang, WANG Hao, LIU Wuren, ZHENG Jinyu. Effects of different straw returning methods on maize yield and economic benefits in black soil region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 67-81.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.06

黑土区不同秸秆还田方式对玉米产量及经济效益的影响

李瑞平¹ 罗洋² 隋鹏祥² 王浩² 刘武仁² 郑金玉^{2*}

(1. 内蒙古农业大学 农学院/内蒙古自治区作物栽培与遗传改良重点实验室, 呼和浩特 010019;

2. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心) 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)

摘要 为探究东北黑土区不同秸秆还田方式对玉米产量和经济效益的影响,基于2017—2023年7年定位试验,探究常规耕作秸秆移除(CT)、秸秆深翻还田(PTSR)、秸秆碎混还田(RTSR)和秸秆覆盖还田免耕(NTSR)4个处理对土壤理化性质和玉米生长发育的影响,并分析其经济效益。结果表明:1)不同秸秆还田方式主要影响>10—20 cm 土层土壤容重,表现为CT>NTSR>RTSR>PTSR;秸秆还田6年后,不同处理之间土壤有机质含量差异均达到显著水平($P<0.05$),与CT相比,NTSR处理0—5 cm 土层有机质含量显著增加19.9%($P<0.05$),PTSR处理>20—30 cm 土层有机质含量显著增加19.8%($P<0.05$);PTSR、RTSR和NTSR显著提高了5 cm 土层处土壤含水量($P<0.05$),在播种至出苗期,PTSR、RTSR和NTSR土壤含水量分别较CT提高6.1%~13.7%、7.5%~40.1%和39.6%~61.1%;土壤温度分别较CT降低0.12~2.07、1.35~2.50和2.76~4.00℃。2)与CT相比,PTSR生育期进程基本一致,RTSR在出苗期和成熟期分别延迟1~4和1~2 d,NTSR在出苗期和6展叶期分别延迟5~7和3~4 d;NTSR出苗率和整齐度分别降低3.8%~5.8%和17.1%~39.5%。3)结构方程显示,秸秆还田通过改变土壤含水量和温度影响出苗时间,进而影响穗数和百粒重,进一步影响产量。4)土壤含水量和温度是影响玉米产量的关键因子,平水年,PTSR和RTSR可较好地平衡土壤水分和温度矛盾,保障玉米产量;NTSR显著降低土壤温度,延迟生育进程,显著降低玉米产量。5)不同秸秆还田方式经济效益差异较大,有补贴政策支持下PTSR经济效益最高,无补贴政策支持下RTSR经济效益最高。综上,秸秆还田方式显著改变了土壤理化性质、调控了玉米生长发育以及经济效益,PTSR和RTSR是黑土区适宜的秸秆还田方式。

关键词 黑土;玉米;秸秆还田;产量

中图分类号 S344.9

文章编号 1007-4333(2026)02-0067-15

文献标志码 A

Effects of different straw returning methods on maize yield and economic benefits in black soil region

LI Ruiping¹, LUO Yang², SUI Pengxiang², WANG Hao², LIU Wuren², ZHENG Jinyu^{2*}

(1. College of Agronomy/Key Laboratory of Crop Cultivation and Genetic Improvement of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Environment/Northeast Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jilin Academy of Agricultural Sciences (Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun 130033, China)

收稿日期: 2025-08-02;接受日期: 2025-11-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1500305);内蒙古自治区自然科学基金项目(2025MS03067);吉林省科技发展计划(20250602017RC、20230302005NC、20230202023NC和20210202024NC)

第一作者: 李瑞平(ORCID:0009-0006-7328-590X),副研究员,主要从事秸秆还田与保护性耕作研究,E-mail:ruipinghappy@126.com

通讯作者: 郑金玉(ORCID:0009-0008-6858-9137),研究员,主要从事耕作制度与合理耕层构建研究,E-mail:15844052867@163.com

Abstract To explore the effects of different straw returning methods on maize yield and economic benefits in the black soil region of Northeast China, a 7-year from 2017 to 2023 fixed-site experiment was conducted. The study investigated physical and chemical properties, maize growth and development, and their economic benefits under four treatments: conventional tillage without straw returning (CT), plough tillage with straw returning (PTSR), rotary tillage with straw returning (RTSR), and no-tillage with straw returning (NTSR). The results indicate that: 1) Different straw returning methods primarily affect the soil bulk density at the $>10\text{-}20\text{ cm}$ soil depth, with the order of magnitude being $\text{CT}>\text{NTSR}>\text{RTSR}>\text{PTSR}$; after 6 years of straw returning, the differences in soil organic matter content among treatments reached significant levels ($P<0.05$). Compared with CT, the soil organic matter content in $0\text{-}5\text{ cm}$ soil layer of NTSR treatment increased significantly by 19.9%, while the PTSR treatment increased by 19.8% in the $>20\text{-}30\text{ cm}$ soil layer. PTSR, RTSR, and NTSR significantly increased the soil water content in the 5 cm soil layer. During the sowing to emergence (S-VE), the soil water content under PTSR, RTSR, and NTSR treatments increased by 6.1%-13.7%, 7.5%-40.1%, and 39.6%-61.1%, the soil temperature decreased by $-0.12\text{-}2.07$, $1.35\text{-}2.50$, and $2.76\text{-}4.00\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. 2) Compared to CT, the growth period of PTSR was consistent with CT, RTSR delays the emergence time (VE) and maturity period (R6) by 1-4 days and 1-2 days respectively, and NTSR delays VE and R6 by 5-7 days and 3-4 days respectively. Compared with CT, NTSR reduced emergence rate and emergence uniformity by 3.8%-5.8%, 17.1%-39.5%, respectively. 3) The structural equation model showed that straw returning affected the emergence time by influencing soil water content and temperature, which in turn affects the number of ears and the 100-grain weight, further impacting the yield. 4) Soil water content and temperature are key factors affecting maize yield. In normal years, PTSR and RTSR effectively balanced soil water and temperature conflicting issues, ensuring yield; NTSR significantly reduces soil temperature, delays the growth process, and significantly reduces yield. 5) The economic benefits of different straw returning methods are quite different. PTSR has the highest economic benefit with subsidy policy support, and RTSR has the highest economic benefit without subsidy policy support. In conclusion, straw returning methods significantly altered soil physicochemical properties, influenced maize growth and development, and affected economic benefit. PTSR and RTSR are considered suitable straw returning practices for the black soil region.

Keywords black soil; maize; straw return; yield

黑土是珍贵的土壤资源,被誉为“耕地中的大熊猫”,其土壤肥力高,保水保肥能力强,属于典型高产土壤类型。中国东北享有“中国最大的商品粮生产基地”之称,是国家粮食安全的“压舱石”和“稳压器”,其粮食总产量约占全国粮食总产量的1/4,调出量占全国商品粮总量的1/3^[1],其中玉米播种面积占粮食作物播种面积的50%以上^[2]。然而,该区域长期“重用轻养”的土地管理方式加速农田土壤退化,严重制约了东北地区农业可持续发展,给国家粮食安全带来不确定性^[3]。秸秆还田被认为是改善土壤结构、提高土壤肥力、改善土壤微生物环境的有效方法^[4-6]。目前,在东北地区玉米秸秆直接还田主要包括秸秆深翻还田、秸秆覆盖还田和秸秆混耙(混拌)还田等方式,但在不同区域秸秆还田方式对产量和经济效益的影响不同。因此,揭示黑土区不同的秸秆还田方式对玉米产量的影响及其关键因素,分析其经济效益,对于秸秆还田技术应用和

保障国家粮食安全具有重要意义。

在干旱地区,秸秆覆盖还田在蓄水保墒和提高土壤肥力方面具有优势,对玉米产量增加更加显著^[7-8]。王改玲等^[9]通过长期定位试验表明,秸秆覆盖还田11和15年分别比常规耕作平均增产19.2%和27.6%,丰水年份增产率为5.2%和11.7%,而干旱年份增产率高达85.0%和97.6%;张昊等^[10]研究表明,玉米秸秆整株覆盖还田增加了玉米生育后期单株叶面积和干物质积累,增产幅度达20%以上。此外,有研究表明,秸秆覆盖还田措施虽然增加了土壤水分含量,但会降低玉米早期土壤温度,影响前期生长发育,导致产量降低^[11-12],特别是在凉爽气候区秸秆覆盖免耕条件下影响更大^[13]。梁尧等^[14]在吉林省半湿润区公主岭市研究表明,与传统耕作相比,秸秆覆盖还田免耕玉米产量降低0.1%~7.1%,秸秆深翻还田玉米产量增加5.6%~14.3%;徐莹莹等^[15]在东北半干旱区齐齐哈尔市

研究表明,秸秆覆盖还田、秸秆旋耕还田和秸秆深翻还田分别较常规耕作增产5.06%、9.41%和15.14%;Lv等^[16]在吉林省公主岭市长期定位试验表明,长期秸秆还田可以在降低化肥投入的同时提高玉米产量。此外,一些学者通过Meta分析方法研究了秸秆还田对玉米产量的影响,如张雄智等^[17]通过对1 162组数据研究表明,秸秆还田试验中79.80%的试验表现出增产;Liu等^[18]通过对806组水旱轮作秸秆还田数据研究表明,在旱地秸秆还田可使作物产量提高7%;Zhang等^[19]通过对2 290组试验数据分析表明,不同秸秆还田深度均会增加作物产量,秸秆还田0~20 cm和20~30 cm增产幅度分别达11.2%和10.0%;Cheng等^[20]通过对108组数据进行Meta分析和机器学习研究表明,秸秆还田后玉米平均增产13.9%,增产效应约在还田13年后趋于稳定。可见,秸秆还田对玉米产量影响因秸秆还田方式、还田量、还田年限以及应用区域等有所不同。此外,不同秸秆还田方式经济效益有所差异,在东北地区秸秆覆盖还田等保护性耕作技术每公顷可降低作业成本1 000~1 400元^[21];秸秆深翻还田在吉林省中部雨养区每公顷增加成本310元,产量增加10.1%,收入增加1 355元;在吉林省西部半干旱区结合膜下滴灌每公顷增加成本2 425元,产量增加

47.1%,纯收入增加4 775元^[22]。

虽然前人关于秸秆还田对玉米产量的影响开展了大量研究工作,但在东北黑土区,缺乏通过多年定位试验结合气候条件系统探究秸秆还田方式影响玉米产量的关键因素。本研究拟通过7年定位试验,从耕层土壤理化特性和玉米生长发育视角,系统揭示黑土区秸秆还田方式影响玉米产量的关键因素,分析其经济效益,旨在为国家“藏粮于地,藏粮于技”战略提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年定位于吉林省农业科学院范家屯镇香山村试验站(43°45' N, 125°01' E;海拔高度为120 m),该试验站位于东北平原中部,是典型的黑土区。此区域属于寒温带大陆性气候,雨热同季,年降水量500~600 mm,年均气温4.5℃,无霜期140 d左右,≥10℃积温3 200~3 300℃。试验期间(2017—2023年)降雨量和≥10℃积温见表1。0~20 cm耕层土壤基本理化性质为:土壤容重1.39 g/cm³、有机质含量29.88 g/kg、全氮1.50 g/kg、全磷0.54 g/kg、全钾18.96 g/kg、pH 6.11。试验区域为一熟制,玉米连作,常规耕作方式为垄作秸秆不还田。

表1 2018—2023年玉米生育期间降雨量和≥10℃积温

Table 1 Precipitation and ≥10℃ accumulated temperature during the growth period of maize from 2018 to 2023

气候条件 Climatic conditions	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
降雨量/mm Precipitation	555	714	633	778	641	448
≥10℃积温/℃	3 227	3 011	3 000	3 346	3 358	3 369
≥10℃ accumulated temperature						

1.2 试验设计

本研究共设4个处理,即常规耕作秸秆移除(CT)、秸秆深翻还田(PTSR)、秸秆碎混还田(RTSR)和秸秆覆盖还田免耕(NTSR),具体试验处理描述见李瑞平等^[23]研究。各处理行数为20行,行距65 cm,行长70 m,3次重复,随机区组排列。

1.3 测试指标及方法

2018—2023年连续6年进行产量测定,土壤有机质含量于2019和2022年玉米收获后取样测试,其他数据为2018—2020年测试。

1.3.1 玉米生育时期、出苗率、株高整齐度和产量

1.3.1.1 生育时期记录 准确记录各处理玉米关键生育时期,包括播种期(ST)、出苗期(VE)、6展叶期(V6)、吐丝期(R1)和生理成熟期(R6)日期。出苗后,各处理选取有代表性的4行,各行连续标定(用红色记号笔标记叶片)10株,记录各生育时期时间。各生育时期判断方法按照符合某生育时期标准的株数是否达到总株数的50%计算。

1.3.1.2 出苗率统计 出苗后,去掉边行和地头10 m,统计10 m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)×100%。

1.3.1.3 株高整齐度 群体整齐度采用株高变异系数的倒数表示。在玉米6展叶期每个处理随机选5行,每行连续选取10株测量株高,测量精度为1 cm。

1.3.1.4 产量和产量构成 每个处理去掉4个边行和地头10 m,测产面积20 m²,3次重复。统计株数、有效穗数、空秆数和双穗数,称取有效穗数鲜重,计算单穗重。选取20穗接近平均穗鲜重样穗称重装入网袋,待风干后进行考种,考种时记录穗行数、行粒数、百粒重和籽粒含水率,然后计算标准水(14%)籽粒产量。

1.3.2 土壤容重和有机碳含量

1.3.2.1 土壤容重 土壤容重测量采用环刀法,收获前1~2 d测定每个处理0—50 cm土层土壤容重,每10 cm为1层,每个处理每个深度重复3次。

1.3.2.2 土壤有机质 2019和2022年玉米收获后,每个小区内按照“S”型5点取样法取样,每点按照0—5、>5—10、>10—20和>20—30 cm分4层取样,将每层5点样品分别混合均匀,采用四分法留取1 kg左右土样装入土袋带回实验室,置于阴凉处自然风干,用于测定有机质含量。测试方法参考鲁如坤^[24]主编的《土壤农业化学分析方法》。

1.3.3 土壤温湿度

1.3.3.1 土壤含水量 采用杭州泽大仪器有限公司生产的ZDR-20T土壤水分温度记录仪测量土壤体积含水量,每个处理记录5、15和30 cm处土壤含水量,具体测试方法和数据分析见李瑞平等^[23]研究。

1.3.3.2 土壤温度 采用美国光谱工业技术有限公司生产的Watch Dog B系列防水纽扣记录仪(B101型)监测,具体测试方法和数据分析见李瑞平等^[23]研究。

1.3.4 经济效益统计

经济效益统计采用试验数据和调研相结合的方法,准确记录各个处理投入(土地成本、人工成本、农资成本和农机作业成本)和产出(产量收益和补贴等)。

1.4 统计分析

采用Excel 2019软件进行数据处理与制图,采用SPSS 22.0软件进行方差分析和Duncan法显著性检验,采用AMOS软件(IBM SPSS AMOS 22.0)建立结构方程模型(SEM)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对玉米产量及其构成的影响

由表2可知,与CT相比,2018—2020年NTSR

表2 不同秸秆还田方式玉米产量及产量构成

Table 2 Maize yield and yield components of different straw returning methods

年份 Year	处理 Treatment	穗数/(10 ⁴ /hm ²) Ear number	穗粒数 Grain number per ear	百粒重/g 100-grain weight	产量/(kg/hm ²) Yield
2018	CT	5.21 a	643.1 a	37.9 ab	11 786.5 ab
	PTSR	5.28 a	646.7 a	38.7 a	12 015.2 a
	RTSR	5.23 a	626.7 ab	37.0 bc	11 155.5 ab
	NTSR	5.14 a	606.1 b	36.0 c	10 902.2 b
2019	CT	5.08 a	673.7 a	37.4 a	11 092.2 a
	PTSR	5.05 ab	666.7 a	37.8 a	11 128.6 a
	RTSR	5.16 a	670.1 a	38.1 a	11 604.9 a
	NTSR	4.85 b	643.6 b	34.3 b	9 365.8 b
2020	CT	5.44 a	652.9 ab	34.8 b	10 854.4 a
	PTSR	5.38 ab	670.6 a	35.8 a	11 264.2 a
	RTSR	5.36 ab	654.5 ab	35.3 ab	11 092.5 a
	NTSR	5.21 b	638.9 b	33.2 c	9 797.9 b

注:CT为常规耕作秸秆移除,PTSR为秸秆深翻还田,RTSR为秸秆碎混还田,NTSR为秸秆覆盖还田免耕。同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: CT, PTSR, RTSR and NTSR represent conventional tillage without straw returning, plough tillage with straw returning, rotary tillage with straw returning, and no-tillage with straw returning, respectively. Within the same column, the different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

产量分别显著降低 7.5%、15.6% 和 9.7% ($P<0.05$)。产量构成数据显示,2018 年不同秸秆还田方式玉米有效穗数差异不显著 ($P>0.05$),2019 年 NTSR 显著低于 CT 和 RTSR ($P<0.05$),2020 年 NTSR 显著低于 CT ($P<0.05$)。在穗粒数方面,2018 年 NTSR 显著低于 CT 和 PTSR ($P<0.05$),2019 年 NTSR 显著低于其他处理 ($P<$

0.05),2020 年 NTSR 显著低于 PTSR ($P<0.05$)。不同秸秆还田方式之间籽粒百粒重 2018 年表现为 PTSR>CT>RTSR>NTSR,2019 年表现为 RTSR>PTSR>CT>NTSR,2020 年表现为 PTSR>RTSR>CT>NTSR。由表 3 可知,年份与处理交互对百粒重和产量具有显著影响 ($P<0.05$)。

表 3 秸秆还田方式与年份对玉米产量及其构成影响的交互分析

Table 3 Analysis of the interaction between straw returning methods and years on maize yield and its components

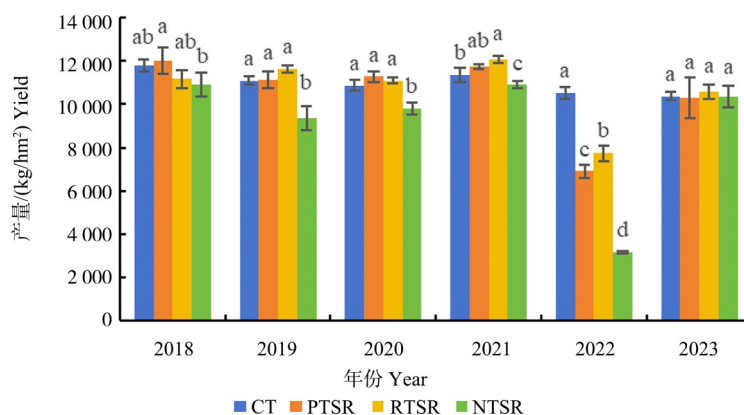
变异来源 Source of variation	穗数/($10^4/\text{hm}^2$) Ear number	穗粒数 Grain number per ear	百粒重/g 100-grain weight	产量/(kg/hm^2) Yield
Y	**	**	**	**
T	*	**	**	**
Y×T	ns	ns	**	**

注:Y 为年份,T 为处理。*表示在 0.05 水平上显著,**表示在 0.01 水平上显著,ns 表示差异不显著。

Note: Y represents the year, T represents the treatment. * indicates significance at the 0.05 level, ** indicates significance at the 0.01 level, ns indicates no significant difference.

对 2018—2023 年 6 年产量数据进行分析,结果见图 1。与 CT 相比,PTSR 和 RTSR 除了 2022 年显著降低产量外 ($P<0.05$),其他 5 年产量与 CT 差异不显著 ($P>0.05$);NTSR 产量除了 2023 年与 CT 产量差异不显著外 ($P>0.05$),其余 5 年均显著降低 ($P<0.05$),

降低幅度为 7.5%~69.9%。因此,降雨量和积温正常年份,PTSR 和 RTSR 处理产量与 CT 基本持平,但是在特殊年份(如 2022 年 7 月份降雨量达 270 mm,单日降雨量达 50 mm)会减产,NTSR 处理几乎每年降低产量,特殊年份会减产幅度更大。



同一年份不同小写字母表示 0.05 水平下差异显著。下同。

Different lowercase letters in the same year indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

图 1 不同秸秆还田方式玉米产量差异

Fig. 1 Differences in maize yield under different straw returning methods

2.2 不同秸秆还田方式对土壤理化性质的影响

2.2.1 不同秸秆还田方式对土壤容重的影响

由图 2 可知,2018 年各处理间土壤容重差异主要发生在 >10—20 和 >20—30 cm 土层 ($P<0.05$)。

在 >10—20 cm 土层,与 CT 相比,NTSR、RTSR 和 PTSR 处理土壤容重分别降低 4.6%、5.9% 和 11.1%;在 >20—30 cm 土层,RTSR 和 NTSR 分别增加 8.5% 和 2.1%。2019 年土壤容重差异发生在

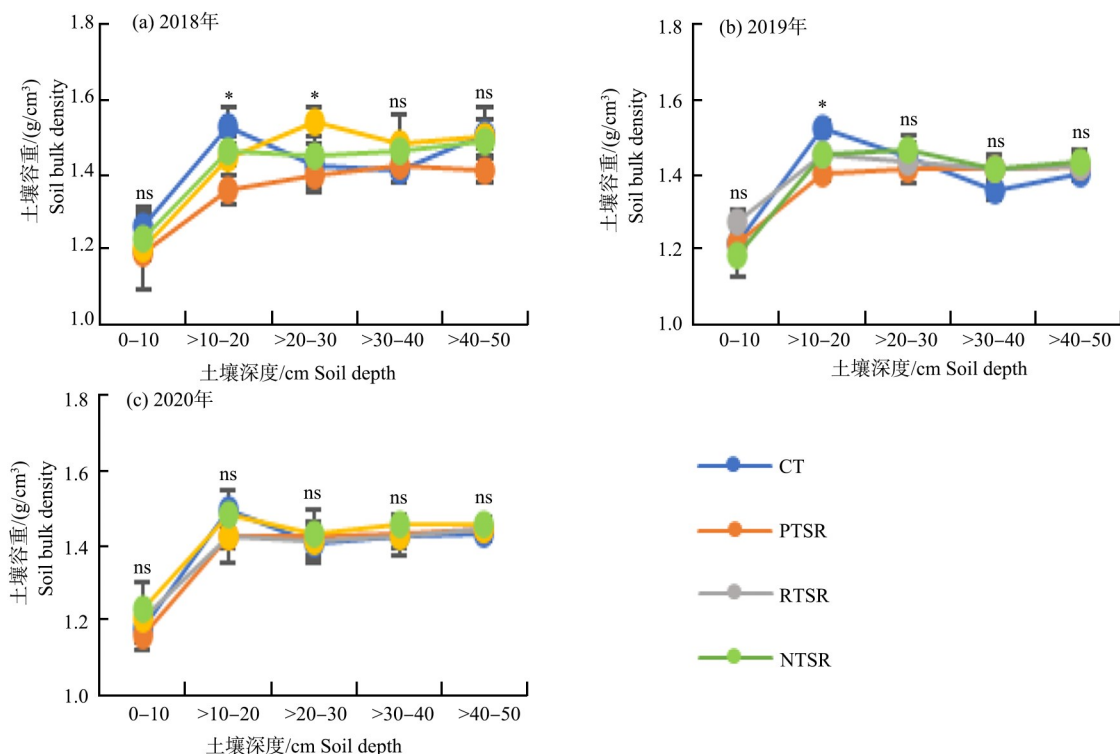


图2 不同秸秆还田方式土壤容重变化

Fig. 2 Changes in soil bulk density under different straw returning methods

>10—20 cm 土层 ($P < 0.05$), 与 CT 相比, NTSR、RTSR 和 PTSR 分别降低 4.6%、4.6% 和 7.9%。2020 年土壤容重从高到低表现为 CT>NTSR>RTSR>PTSR, 但各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2.2 不同秸秆还田方式对土壤有机质含量的影响

由图 3 可知, 秸秆还田 3 年后 (2019 年), 不同土壤深度不同处理土壤有机质含量差异达到显著

水平 ($P < 0.05$)。与 CT 相比, 0—5 cm 土层, NTSR 显著增加 22.6% ($P < 0.05$), PTSR 和 RTSR 分别显著降低 8.7% 和 7.8% ($P < 0.05$); >5—10 cm 土层, NTSR 显著增加 8.5% ($P < 0.05$); >10—20 cm 土层, NTSR 显著增加 7.0% ($P < 0.05$), RTSR 显著降低 7.4% ($P < 0.05$); >20—30 cm 土层, NTSR 和 RTSR 分别显著降低 5.7% 和 15.8% ($P < 0.05$)。试验实施 6 年后 (2022 年), 与 CT 相比, 0—5 cm 土层, NTSR 显著

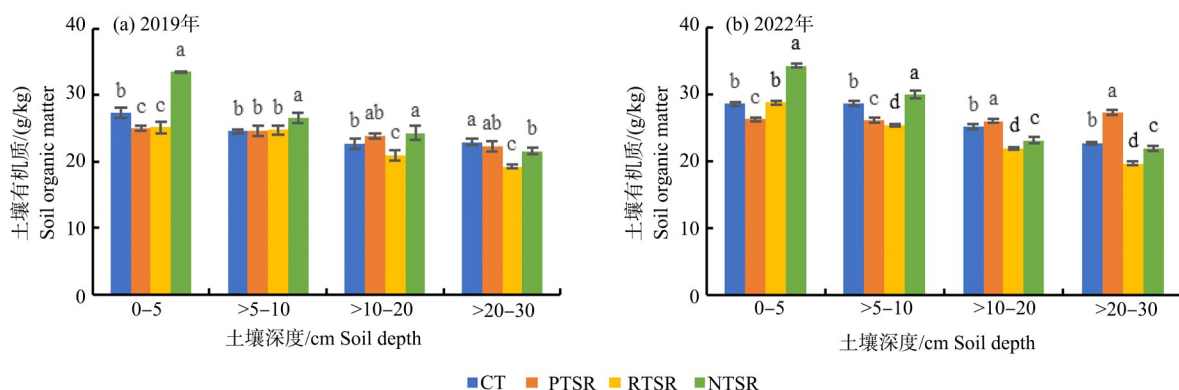


图3 不同秸秆还田方式土壤有机质含量差异变化

Fig. 3 Changes in soil organic matter content under different straw returning methods

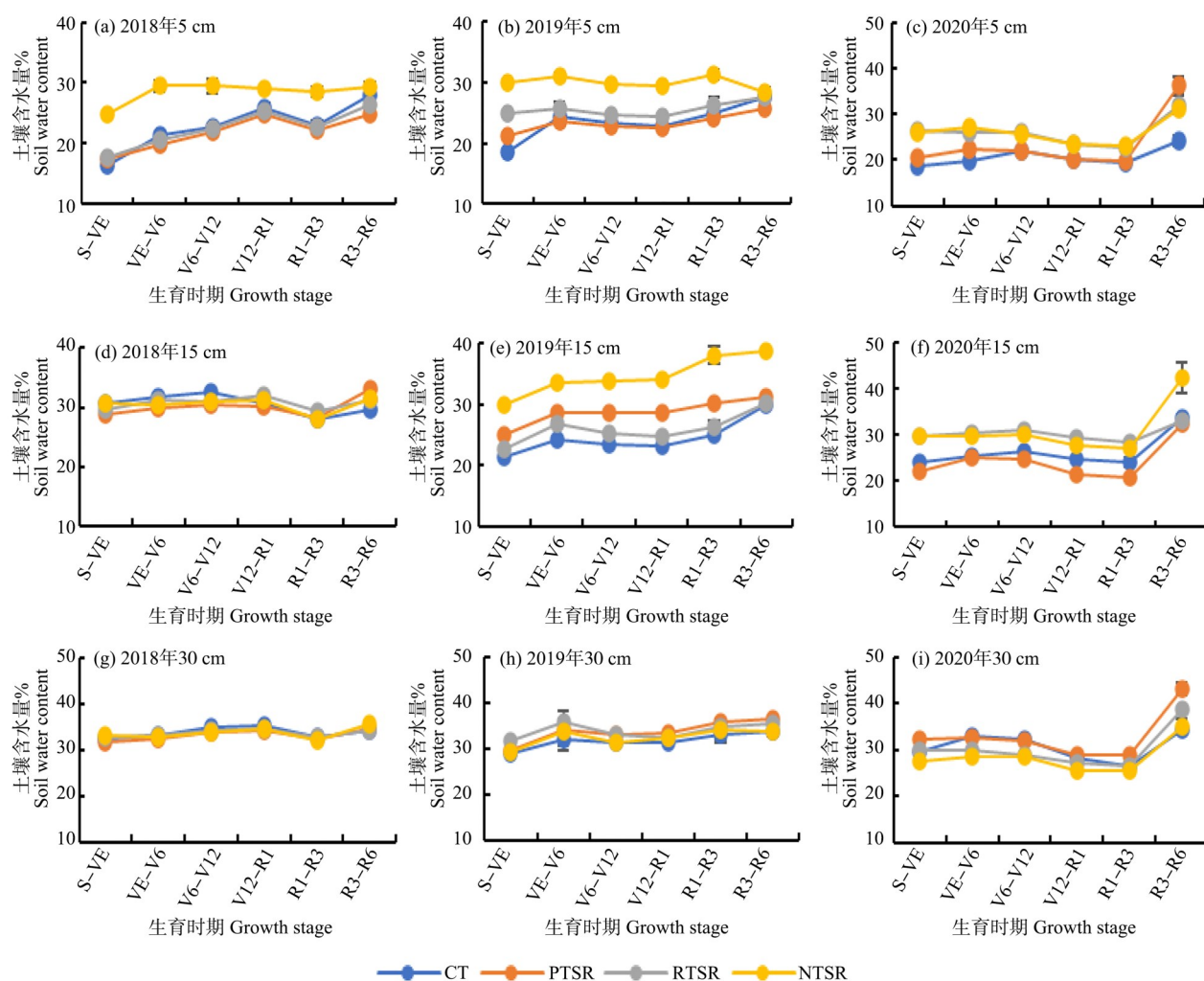
提高19.9% ($P<0.05$), PTSR显著降低8.0% ($P<0.05$); >5—10 cm 土层, NTSR显著提高4.9% ($P<0.05$), PTSR和RTSR分别显著降低8.6%和11.1% ($P<0.05$); >10—20 cm 土层, NTSR和RTSR分别显著降低7.9%和12.6% ($P<0.05$), PTSR显著提高3.5% ($P<0.05$); >20—30 cm 土层, NTSR和RTSR分别显著降低3.4%和13.4% ($P<0.05$), PTSR显著提高19.8%。

综上,不同秸秆还田方式影响0—30 cm 土层土壤有机质含量, NTSR显著增加了0—5 cm 土壤有机质含量,而PTSR和RTSR降低表层土壤有机质

含量;随着试验年限延长PTSR表现出增加>10—30 cm 土壤有机质含量的趋势。

2.2.3 不同秸秆还田方式对土壤水分的影响

由图4可知,不同秸秆还田方式对玉米各生育阶段土壤含水量具有显著影响 ($P<0.05$)。与CT相比,NTSR显著提高了5和15 cm 土层土壤含水量 ($P<0.05$),其中5 cm 土层土壤含水量增加幅度最大。在S—VE阶段,2018、2019和2020年PTSR、RTSR和NTSR处理5 cm 土层土壤含水量分别较CT提高6.1%、7.5%和51.7%,13.7%、34.3%和61.1%,9.1%、40.1%和39.6%。



S—VE, VE—V6, V6—V12, V12—R1, R1—R3, R3—R6 分别代表播种至出苗期、出苗期至6叶期、6叶期至12叶期、12叶期至吐丝期、吐丝期至灌浆期、灌浆期至成熟期。

S-VE, VE-V6, V6-V12, V12-R1, R1-R3 and R3-R6 represent sowing to emergence, emergence to 6-leaf stage, 6-leaf stage to 12-leaf stage, 12-leaf stage to silking stage, silking stage to milking stage, milking stage to maturity stage, respectively.

图4 不同秸秆还田方式土壤含水量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes in soil water content in different straw returning methods

2.2.4 不同秸秆还田方式对土壤温度的影响

2018—2020年玉米S—VE和VE—V6阶段土壤温度差异如图5所示。与CT相比,2018年S—VE阶段,PTSR处理30 cm土层显著降低1.14 °C($P < 0.05$),RTSR处理5和30 cm土层分别显著降低2.5和1.52 °C($P < 0.05$),NTSR处理5、15和30 cm土层分别显著降低2.76、2.03和2.25 °C($P < 0.05$);VE—V6阶段,NTSR处理5、15和30 cm土层分别显著降低2.82、1.92和2.17 °C($P < 0.05$)。与CT相比,2019年S—VE阶段,NTSR处理5、15和30 cm土层分别显著降低3.73、3.36和2.91 °C($P < 0.05$);VE—V6阶段,RTSR处理5、15和30 cm土层分别显著降低1.35、0.81和0.75 °C($P < 0.05$),

NTSR处理5、15和30 cm土层分别显著降低2.12、1.63和1.63 °C($P < 0.05$)。与CT相比,2020年S—VE阶段,PTSR和RTSR处理5 cm土层分别显著降低2.07和1.69 °C($P < 0.05$),NTSR处理5、15和30 cm土层分别显著降低4.00、2.58和0.99 °C($P < 0.05$);VE—V6阶段,NTSR处理5和30 cm土层显著降低2.67和2.37 °C($P < 0.05$)。

综上,不同秸秆还田方式对土壤温度具有显著影响,与CT相比,PTSR降低不同土层温度的幅度与概率较小,RTSR次之,NTSR显著降低不同土层温度,其中5 cm土壤温度降低幅度最大,随着土壤深度的增加降低幅度减小,VE—V6降低幅度小于S—VE。

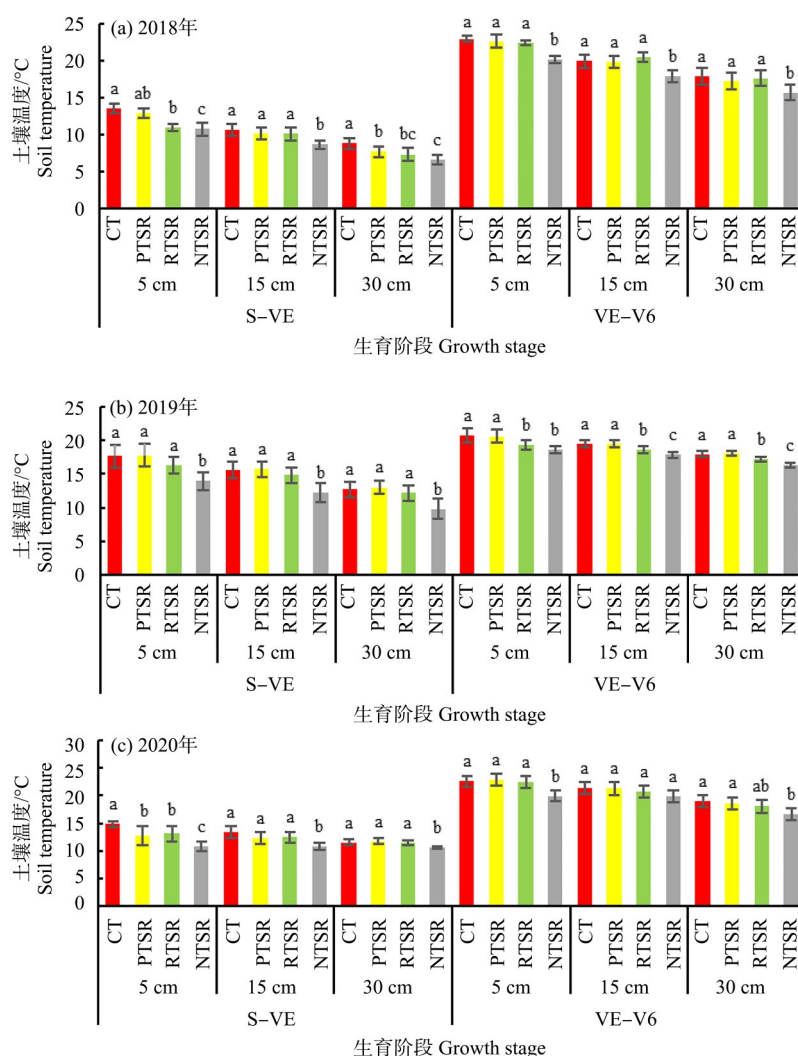


图5 不同秸秆还田方式土壤温度变化

Fig. 5 Changes in soil temperature under different straw returning methods

2.3 不同秸秆还田方式对玉米出苗的影响

2.3.1 不同秸秆还田方式对玉米出苗时间的影响

由表 4 可知,不同秸秆还田方式之间生育进程差异主要由于 VE 延迟所导致,随着生育进程的推进,不同秸秆还田方式之间的差异呈缩小趋势。在

同一年度,PTSR 与 CT 生育进程基本一致,RTSR 和 NTSR 延迟了各生育阶段时间,其中 NTSR 延迟时间最长。综上,与 CT 相比,RTSR 在 VE 和 R6 分别延迟 1~4 和 1~2 d,NTSR 在 VE 和 R6 分别延迟 5~7 和 3~4 d。

表 4 不同秸秆还田方式玉米关键生育时期差异
Table 4 Differences in maize's key growth stages under different straw returning methods d

年份 Year	处理 Treatment	生育时期 Growth stage		
		出苗期 VE	吐丝期 R1	成熟期 R6
2018	CT	0	0	0
	PTSR	0	-1	0
	RTSR	4	2	1
	NTSR	5	2	3
2019	CT	0	0	0
	PTSR	1	1	1
	RTSR	1	2	1
	NTSR	5	4	4
2020	CT	0	0	0
	PTSR	0	0	0
	RTSR	2	2	2
	NTSR	7	5	4

注:负数表示生育期提前,正数表示生育期延迟。
Note: The negative number indicates that the growth stage is advanced days, and the positive number indicates that the growth stage is delayed days.

2.3.2 不同秸秆还田方式对出苗率的影响

由图 6 可知,同一年份不同秸秆还田方式之间出苗率差异不显著($P>0.05$)。与 CT 相比,2018 年 RTSR 和 NTSR 出苗率分别降低 1.5% 和 3.8%;2019 年 PTSR 和 RTSR 出苗率分别增加 5.5% 和 8.4%,NTSR 降低 1.3%;2020 年 NTSR 出苗率降低 5.9%。

2.3.3 不同秸秆还田方式对玉米株高整齐度的影响

由图 7 可知,与 CT 相比,2018 年 PTSR 整齐度提高 7.3%,RTSR 和 NTSR 分别降低 36.9% 和 35.4%;2019 年 PTSR 和 NTSR 整齐度分别降低 11.7% 和 17.1%;2020 年 PTSR 和 RTSR 整齐度分别提高 99.3% 和 63.8%,而 NTSR 降低 39.5%。

2.4 不同秸秆还田方式对玉米产量影响因素分析

图 8 结构方程模型(SEM)揭示了 4 种不同秸秆

还田方式影响玉米产量变化的直接和间接因子,秸秆还田方式极显著影响了土壤含水量(SWC)、土壤温度(ST)和土壤有机质含量(SOM)($P<0.001$)。SWC 和 ST 与百粒重(100-W)呈现极显著负相关($P<0.01$);ST 与生育进程相差天数(PPD)和 SOM 呈现极显著负相关($P<0.001$);PPD 分别与穗数(EN)和百粒重(100-W)呈现极显著负相关($P<0.01$)和显著负相关($P<0.05$)。EN 和 100-W 是影响玉米产量的直接因子,与产量呈极显著正相关($P<0.001$),二者对产量的贡献率达到 87.0%。间接因子中,土壤容重(SBD)和 SOM 对玉米产量无显著影响($P>0.05$),而 SWC 通过影响 100-W 进而影响产量;ST 则通过影响 PPD 进而影响 EN 和 100-W,最终影响产量。影响玉米产量的间接因子中,SWC 和 ST 是重要因子。

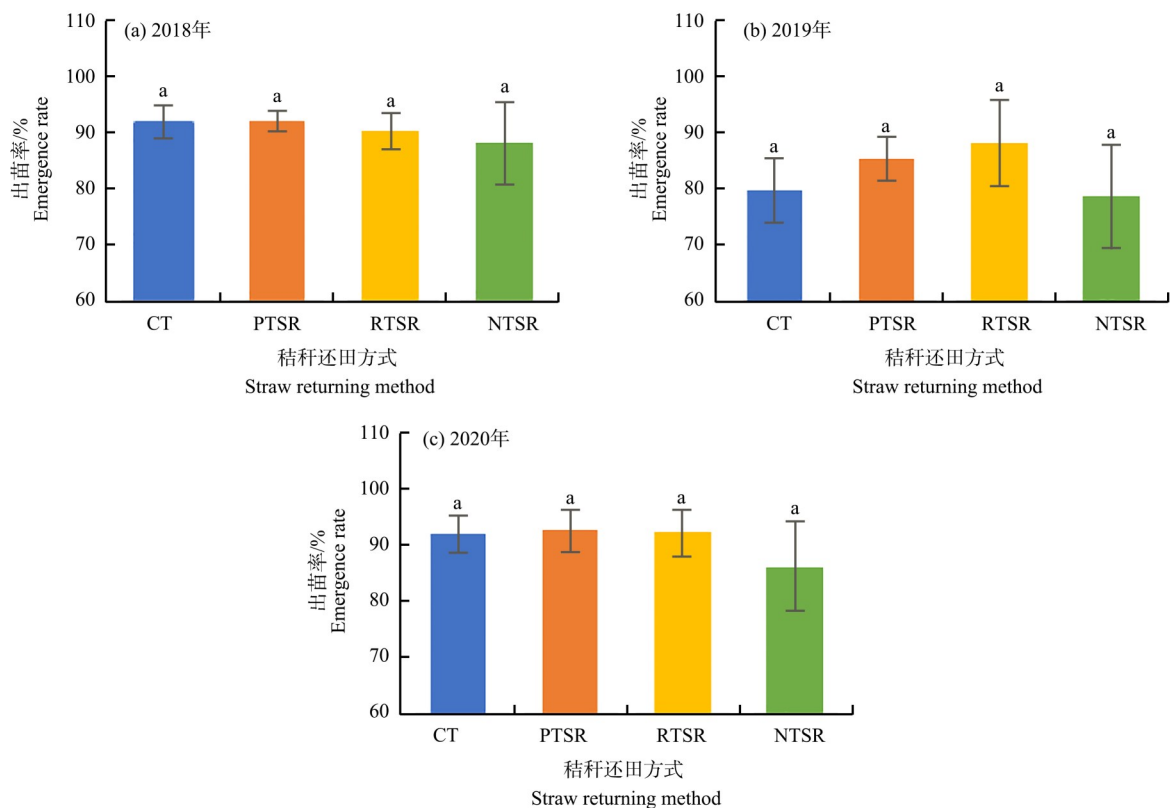


图6 不同秸秆还田方式玉米出苗率差异

Fig. 6 Differences in maize emergence rate under different straw returning methods

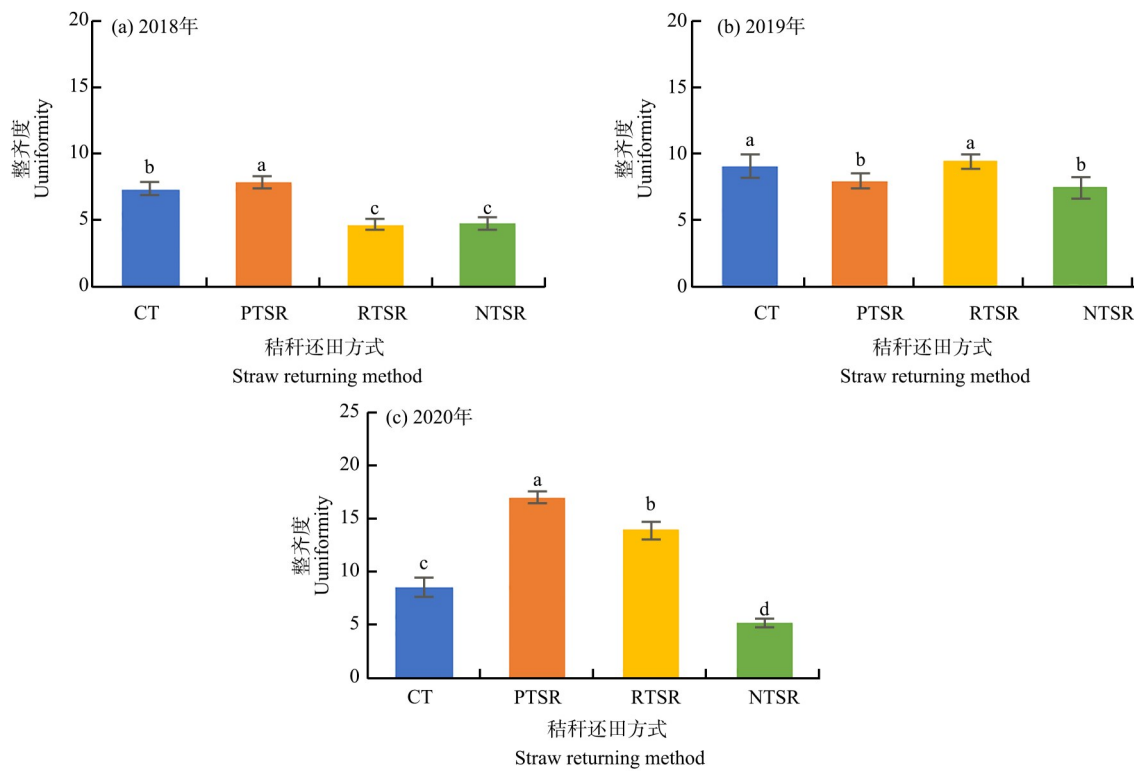
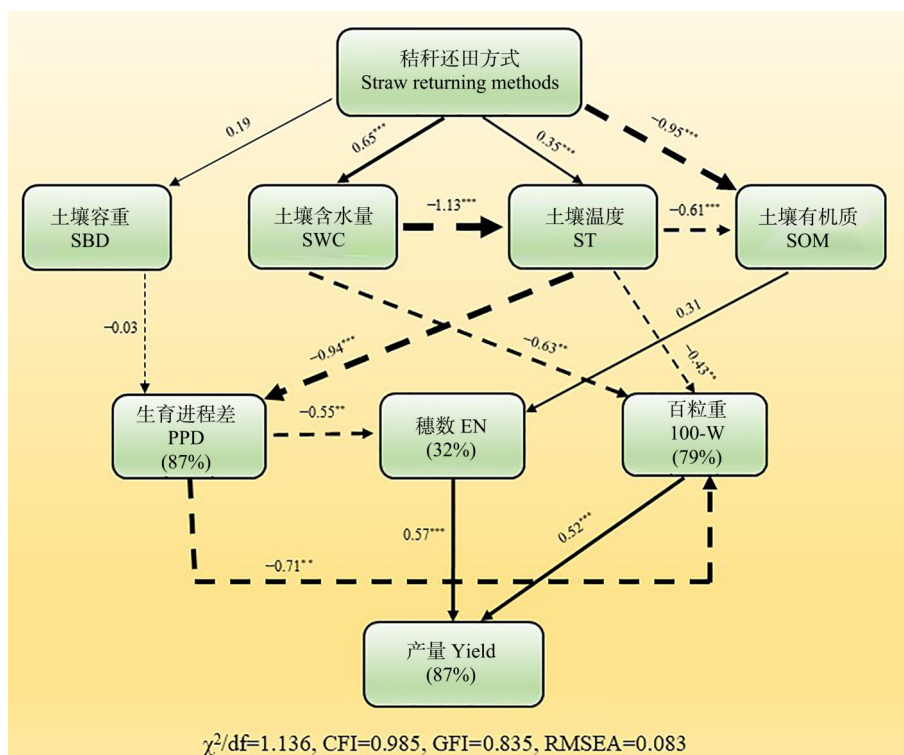


图7 不同秸秆还田方式玉米株高整齐度差异

Fig. 7 Differences in uniformity of plant height under different straw returning methods



SBD、SOM和SWC分别代表0—20 cm土层土壤容重、土壤有机质含量、播种至成熟期5 cm土壤含水量;ST代表播种至6叶期5 cm土壤日平均温差;PPD、EN、100-W和Yield分别代表物候期相差天数、有效穗数、百粒重和产量。*、**和***分别表示在0.05、0.01和0.001水平上差异显著。

SBD, SOM, and SWC indicate soil bulk density at 0-20 cm, soil water content at 5 cm from sowing to maturity, ST indicates average daily temperature difference at 5 cm from sowing to V6. PPD, EN, 100-W indicate the difference days of phenology, ear number, 100-grain weight, respectively. *, **, *** indicates significance at the 0.05, 0.01, 0.001 level, respectively.

图8 不同秸秆还田方式对玉米产量影响的结构方程模型

Fig. 8 Structural equation models of the effects of different straw returning methods on maize yield

2.5 不同秸秆还田方式对经济效益的影响

不同秸秆还田方式经济效益见表5,与CT相比,PTSR、RTSR和NTSR每公顷投入成本分别降低150、1 090和1 890元;PTSR和RTSR每公顷产出分别增加861和500元,NTSR每公顷降低2 218元;PTSR和RTSR合计收入每公顷分别增加2 360和499元,NTSR每公顷降低1 619元;PTSR、RTSR和NTSR每公顷净收益(未去除相关政策补贴)分别增加2 511、1 590和272元,去除相关政策补贴,PTSR和RTSR每公顷净收益分别增加1 011和1 590元,而NTSR净收益降低328元。

综上,在本研究条件下,有补贴政策支持下PTSR经济效益最高,无补贴政策支持下RTSR经济效益最高;有补贴政策支持下NTSR经济效益增加不明显,无补贴政策支持下经济效益降低。

3 讨论

3.1 东北黑土区秸秆还田影响玉米产量的关键因素

秸秆还田对玉米产量影响较为复杂,但不同的秸秆还田方式对土壤产生不同的物理、化学和微生物效应^[25-26]。在冷凉区,秸秆覆盖还田虽然增加了土壤水分含量,但会降低玉米早期土壤温度,影响前期生长发育^[27],而70%秸秆覆盖免耕较好地平衡了土壤水热矛盾^[28]。相比而言,秸秆深翻还田降低了0—20 cm土壤容重,提高了20—40 cm土壤有机质和速效养分含量^[14]。在旱地,秸秆还田可以缓解土壤酸化^[18];长期秸秆还田增加土壤养分,降低化肥投入^[16]。Liu等^[29]通过5种秸秆还田方式12年定位试验研究表明,土壤物理性质指数对玉米产量的贡献高于化学性质指数和微生物指数18.6%~156.8%。

表5 不同秸秆还田方式经济效益统计

Table 5 Economic benefit calculation of different straw returning methods

元/hm²

项目 Item	CT	PTSR	RTSR	NTSR
投入 Input	18 328	18 178	17 238	16 438
产出 Output	22 794	23 655	23 294	20 576
政策补贴 Policy subsidy	1 505	3 005	1 505	2 105
合计收入 Total income	24 300	26 660	24 799	22 681
净收益 Net benefit	5 971	8 482	7 561	6 243
去除补贴净收益 Net benefit after removing subsidy	4 466	5 477	6 056	4 138

注:投入包括土地成本、人工投入、农资成本和农机作业成本,合计收入=产出+相关补贴,净收益=合计收入-投入,去除补贴净收益=净收益-政策补贴。

Note: Input includes land cost, labor input, agricultural material cost and agricultural machinery operation cost, total income=output+policy subsidy, net benefit=total income-input, net benefit after removing subsidy=net benefit-policy subsidy.

此外,不同生态区域秸秆还田方式产生效应有不同^[30],在东北半干旱区,由于秸秆覆盖还田、秸秆旋耕还田和秸秆深翻还田均降低土壤容重,增加孔隙度和含水量,进而能够增产^[15]。本研究中,不同秸秆还田方式对土壤理化特性和玉米生长发育产生显著影响,但不同秸秆还田方式影响程度有所不同,归因于本研究区域属于典型半湿润黑土区,传统耕作措施土壤结构差,土壤水肥协调能力低,不同秸秆还田方式对耕层结构影响有所不同,造成水肥协调能力不同。PTSR和RTSR显著降低了>10—20 cm土壤容重,降低了0—10 cm土壤有机质含量,连续6年秸秆还田PTSR显著增加了>20—30 cm土壤有机质含量,这与梁尧等^[14]在吉林省半湿润区的研究结果秸秆深翻还田提高亚耕层土壤有机碳含量一致,可能由于相同区域秸秆深翻还田技术效果基本相同。NTSR虽然显著提高了表层土壤含水量和有机质含量,但显著降低玉米生育前期土壤温度,导致玉米出苗时间延迟、苗期整齐度较低,进而产量显著低于其他秸秆还田方式。PTSR和RTSR较好平衡了土壤理化特性,其玉米产量与常规垄作相比,除了2022年之外,未发生显著减产情况。由于2022年7月份降雨量高达270 mm,单日降雨量达到50 mm,短期降雨量高导

致试验田积水,PTSR、RTSR和NTSR属于平作排水不畅,长期积水导致玉米根系受损影响产量,而CT为垄作体现出排水优势,对产量影响较小。结构方程揭示了土壤含水量和温度是影响玉米产量的关键因素,进而影响生育进程、穗数和百粒重,最终影响产量。

本研究中,从土壤理化特性视角探究秸秆还田方式对玉米产量的影响,未从土壤微生物特性视角揭示其机理,在今后研究中进一步加强该领域研究工作。

综上,在本研究条件下,土壤含水量和温度是影响玉米产量的关键因子,秸秆还田通过调节土壤含水量和温度影响玉米生长发育和产量构成因素,最终影响产量。

3.2 因地制宜采用秸秆还田方式,助力单产提升及黑土地保护

虽然秸秆还田具有较多优点,但区域和年际间产量效应差异较大。在2022年单月和短期降雨量偏高,PTSR、RTSR和NTSR产量均显著降低。如何针对气候变化合理应用秸秆还田方式是当前需要解决的难题,特别是近年来试验区域呈现出降雨量偏高,春季土壤温度低、回升慢等现象。PTSR具有改善耕层结构和增产潜力、能够实现全量秸秆还

田,但是PTSR需要大型动力和农机设备完成,投入成本高,适宜黑土深厚区域、有政策补贴时新型经营主体采用,普通农户难以实现。RTSR也具有改善耕层结构和增产潜力,但是缺乏相应的农机设备,常采用旋耕机和深松机代替联合整地机,作业质量大打折扣,且该项技术未纳入黑土地保护、保护性耕作政策补贴,不利于推广应用。NTSR显著提高土壤含水量和表层土壤有机质含量,但是显著降低土壤温度和产量;此外,秸秆覆盖免耕技术受气候条件、地形和土壤类型等因素影响^[31],需要针对不同生态条件应用,进行区域优化或技术改进,更有利于其推广应用。

此外,建立综合的政策补贴机制对科学引导秸秆还田保护黑土至关重要。本研究显示,在有政策补贴和无政策补贴不同秸秆还田方式净收益差别较大。针对近年来气候变化的复杂性以及区域土壤类型不同,应建立综合的补贴机制,而不是对单个项目、单项技术进行补贴。因地制宜、因区施策,如针对在东北西部半干旱区降雨量少、土壤沙化严重,补贴政策更倾向于以秸秆覆盖为主的保护性耕作技术;针对东北中部半湿润区土壤结构差、秸秆量大等问题,补贴政策更倾向于秸秆深翻还田、碎混还田等。本研究也证明有政策补贴支持时深翻还田经济效益最高。通过政策补贴建立形成秸秆还田与轮作、轮耕合理的耕作制度,助力黑土地保护和单产提升。

4 结 论

本研究以CT为对照,探究了PTSR、RTSR和NTSR不同秸秆还田方式对土壤理化性质、玉米生长发育和产量以及经济效益的影响。主要结论如下:

1)不同秸秆还田方式对土壤理化性质影响不同。PTSR和RTSR显著降低了>10—20 cm土壤容重和0—10 cm土壤有机质含量,但是连续实施6年后PTSR显著增加了>20—30 cm土壤有机质含量;NTSR虽显著提高了0—5 cm土壤含水量和有机质含量,但显著降低S—VE阶段0—5 cm土壤温度。

2)土壤含水量和温度是影响玉米产量关键因子。秸秆还田通过影响土壤含水量和温度,进而影响生育进程、穗数和百粒重,最终影响产量。正常

年份,PTSR和RTSR能够平衡CT产生的“高土温”和“低水分”,NTSR产生的“低土温”和“高水分”矛盾,保证产量。

3)建议制定综合的秸秆还田政策补贴机制。不同秸秆还田方式经济效益差异较大,因地制宜、因区施策,建立综合的政策补贴机制,引导形成秸秆还田与轮作和轮耕的科学耕作制度,对黑土地保护和作物单产提升至关重要。

致 谢

感谢中国农业科学院作物科学研究所李少昆老师团队对本研究给予的指导与支持。

参考文献 References

- [1] 李保国, 刘忠, 黄峰, 杨晓光, 刘志娟, 万炜, 汪景宽, 徐英德, 李子忠, 任国生. 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, Yang X G, Liu Z J, Wan W, Wang J K, Xu Y D, Li Z Z, Ren T S. 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 (in Chinese)
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024
National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024 (in Chinese)
- [3] 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 (in Chinese)
- [4] Turmel M S, Speratti A, Baudron F, Verhulst N, Govaerts B. Crop residue management and soil health: A systems analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 134: 6-16
- [5] Cong P, Wang J, Li Y Y, Liu N, Dong J X, Pang H C, Zhang L, Gao Z J. Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104735
- [6] Liu J, Qiu T Y, Peñuelas J, Sardans J, Tan W F, Wei X M, Cui Y X, Cui Q L, Wu C F, Liu L F, Zhou B T, He H R, Fang L C. Crop residue return sustains global soil ecological stoichiometry balance[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(8): 2203-2226
- [7] Li R, Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, Ren X L, Yang B P. 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
- [8] Sidhu A S, Sekhon N K, Thind S S, Hira G S. 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
- [9] 王改玲, 郝明德, 许继光, 洪坚平. 保护性耕作对黄土高原南部地区小麦产

- 量及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 539-544
- Wang G L, Hao M D, Xu J G, Hong J P. Effect of conservation tillage on wheat yield and soil physicochemical properties in the south of Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 539-544 (in Chinese)
- [10] 张昊, 于海秋, 依兵, 王晓光, 蒋春姬, 李飞飞, 曹敏建. 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, Wang X G, Jiang C J, Li F F, Cao M J. 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 (in Chinese)
- [11] Drury C F, Tan C S, Welacky T W, Oloya T O, Hamill A S, Weaver S E. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 101-108
- [12] 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 (in Chinese)
- [13] 刘爽, 张兴义. 不同耕作方式对黑土农田土壤水分及利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 126-131
- Liu S, Zhang X Y. Effects of tillage management on soil water dynamics, yield and water use efficiency in arable black soil cropping system in Northeast China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 126-131 (in Chinese)
- [14] 梁尧, 蔡红光, 闫孝贡, 刘剑钊, 袁静超, 张洪喜, 任军, 王立春. 玉米秸秆不同还田方式对黑土肥力特征的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 107-113
- Liang Y, Cai H G, Yan X G, Liu J Z, Yuan J C, Zhang H X, Ren J, Wang L C. Effect of different maize straw-returning modes on the fertility of black soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6): 107-113 (in Chinese)
- [15] 徐莹莹, 王俊河, 刘玉涛, 高盼, 王宇先, 杨慧莹, 于侃超, 葛选良, 迟莉, 樊景胜. 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 Y Y, Wang J H, Liu Y T, Gao P, Wang Y X, Yang H Y, Yu K C, Ge X L, Chi L, Fan J S. Effects of different returning methods of straw on soil physical property, yield of corn[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(5): 78-84 (in Chinese)
- [16] Lv Y J, Wang Y J, Wang L C, Zhu P. Straw return with reduced nitrogen fertilizer maintained maize high yield in Northeast China[J]. *Agronomy*, 2019, 9(5): 229
- [17] 张雄智, 李帅帅, 刘冰洋, 张云, Ahmad Latif Virk, 王兴, 赵鑫, 张海林. 免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 1-12
- Zhang X Z, Li S S, Liu B Y, Zhang Y, Virk A L, Wang X, Zhao X, Zhang H L. Effects of no-till and residue retention on carbon sequestration and yield in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(5): 1-12 (in Chinese)
- [18] Liu J, Fang L C, Qiu T Y, Chen J, Wang H, Liu M X, Yi J, Zhang H L, Wang C, Sardans J, Chen L, Huang M, Penueles J. Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: A global meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43: 78
- [19] Zhang M M, Yang N, Han X Q, Lal R, Huang T T, Dang P F, Xue J Q, Qin X L, Siddique K H M. Effects of straw returning depth on soil organic carbon sequestration and crop yield in China: A meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 393: 109799
- [20] Cheng J, Lin B J, Chen J S, Duan H X, Sun Y F, Zhao X, Dang Y P, Xu Z Y, Zhang H L. Strategies for crop straw management in China's major grain regions: Yield-driven conditions and factors influencing the effectiveness of straw return[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 212: 107941
- [21] 李保国, 任图生, 王贵满, 周虎, 苗全, 李杜潮, 王力, 王影, 卢奕丽, 朱宇博. 黑土地保护梨树模式的时代意义与展望[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 1-9
- Li B G, Ren T S, Wang G M, Zhou H, Miao Q, Li S C, Wang L, Wang Y, Lu Y L, Zhu Y B. Black soil conservation in Northeast China: Significance and outlook of the Lishu Mode[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 1-9 (in Chinese)
- [22] 蔡红光, 梁尧, 刘慧涛, 刘剑钊, 秦裕波, 刘方明, 袁静超, 张洪喜, 任军, 王立春. 东北地区玉米秸秆全量深翻还田耕种技术研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 123-129.
- Cai H G, Liang Y, Liu H T, Liu J Z, Qin Y B, Liu F M, Yuan J C, Zhang H X, Ren J, Wang L C. Research on full maize straw returning with deep ploughing mode in the Northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5): 123-129 (in Chinese)
- [23] 李瑞平, 罗洋, 隋鹏祥, 郑洪兵, 明博, 李少昆, 王浩, 郑金玉. 玉米秸秆不同还田方式对黑土耕层温度影响的短期效应[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2693-2702
- Li R P, Luo Y, Sui P X, Zheng H B, Ming B, Li S K, Wang H, Zheng J Y. Short-term effect of different returning methods of maize straw on the temperature of black soil plough layer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2693-2702 (in Chinese)
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [25] 隋鹏祥. 秸秆还田方式与施氮量对春玉米产量形成及氮素利用的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020
- Sui P X. Effects of straw incorporation approaches and N rate on yield formation and nitrogen use of spring maize [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [26] Huang T T, Yang N, Lu C, Qin X L, Siddique K H M. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105171
- [27] 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 (in Chinese)

- [28] Li R P, Zheng J Y, Xie R Z, Ming B, Peng X H, Luo Y, Zheng H B, Sui P X, Wang K R, Hou P, Hou L Y, Zhang G Q, Bai S J, Wang H, Liu W R, Li S K. 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
- [29] Liu C Z, Si B C, Zhao Y, Wu Z M, Lu X C, Chen X, Han X Z, Zhu Y C, Zou W X. Drivers of soil quality and maize yield under long-term tillage and straw incorporation in Mollisols[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 246: 106360
- [30] 贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 孙元丰, 李晓阳, 戴志刚, 李坤, 任涛, 鲁剑巍. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的Meta分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 80-89
- Jia R F, Cong R H, Xu Z Y, Sun Y F, Li X Y, Dai Z G, Li X K, Ren T, Lu J W. Meta analysis of straw returning technology to improve soil physicochemical properties and increase the yield of main cereal and oil crop [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4): 80-89 (in Chinese)
- [31] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 张士秀, 黄丹丹, 杨学明, 张晓平, 李秀军, 田春杰, McLaughlin Neil B, 相洋. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. *地理科学*, 2022, 42(8): 1325-1335
- Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, Zhang S X, Huang D D, Yang X M, Zhang X P, Li X J, Tian C J, McLaughlin N B, Xiang Y. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1325-1335 (in Chinese)
- 责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 李瑞平, 博士, 副研究员。主要从事土壤耕作、玉米栽培理论与技术研究。中国农学会、中国作物学会会员。主持国家重点研发计划子课题、吉林省重点研发计划等项目7项, 参与国家自然科学基金项目、国家重点研发计划和农业农村部行业专项等项目20余项, 现主持在研项目4项。以第一作者在 *Soil & Tillage Research*、《应用生态学报》、《中国生态农业学报》(中英文) 等国内外知名期刊发表论文13篇; 撰写地方标准3项; 授权发明专利5项; 参编著作3部。获省(部)级科技奖励9项, 其中吉林省科学技术进步奖一等奖1项, 吉林省农业技术推广一等奖1项, 省(部)级二等奖3项, 省(部)级三等奖4项。



通讯作者简介: 郑金玉, 硕士, 研究员, 吉林省农业科学院土壤耕作团队首席。主要从事农作制度和保护性耕作研究。主持国家重点研发计划课题、公益性行业(农业)科研专项、中国科学院战略性先导科技专项、农业基础性长期性科技工作国家农业环境数据观测监测、吉林省科技发展计划重点研发项目等20余项。制定地方标准5项, 参编著作6部, 授权发明专利5件、实用新型专利7件, 发表论文40余篇。获吉林省科学技术进步奖一等奖1项、二等奖2项, 中华农业科技奖二等奖1项, 吉林省自然科学学术成果奖二等奖2项, 大北农科技奖一等奖1项。