

隋世江, 牛世伟, 王娜. 辽北地区玉米田适宜耕作模式研究 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (10): 1242–1248.
SUI S J, NIU S W, WANG N. Eco-friendly and Efficient Maize Farming for North Liaoning Region [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (10): 1242–1248.

辽北地区玉米田适宜耕作模式研究

隋世江, 牛世伟, 王娜^{*}

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁 沈阳 110161)

摘要:【目的】探究不同耕作模式对玉米产量和土壤物理性状的影响。【方法】通过大田试验研究旋耕 15 cm、深松 30 cm、粉垄 30 cm、粉垄 50 cm、粉垄 30 cm 结合覆膜和粉垄 50 cm 结合覆膜对玉米不同生育时期不同土层的土壤温度和土壤容重, 玉米根数、根长和根体积及玉米产量的影响。【结果】粉垄耕作可提高不同层次土壤温度, 尤其粉垄耕作结合覆膜处理显著提高玉米苗期和拔节期地温 14.14%~23.75% 和 14.34%~25.90%。粉垄耕作处理显著降低玉米苗期和拔节期及成熟期 25~30 cm、45~50 cm 土壤容重 1.91%~3.09%、2.91%~5.21%, 显著增加玉米拔节期至成熟期玉米根数、根长和根体积 13.21%~47.55%、7.14%~38.83% 和 20.63%~110.04%。粉垄耕作结合覆膜处理显著提高玉米产量 11.12%~16.29%, 其中粉垄 30 cm 结合覆膜处理玉米产量最高。【结论】在试验条件下, 粉垄耕作结合覆膜处理能有效改善土壤环境, 促进玉米根系生长, 提高玉米产量, 其中粉垄 30 cm 结合覆膜措施是较适宜的耕作模式。

关键词:玉米; 耕作模式; 土壤性状; 产量

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 10-1242-07

Eco-friendly and Efficient Maize Farming for North Liaoning Region

SUI ShiJiang, NIU Shiwei, WANG Na^{*}

(Plant Nutrition and Environmental Resources Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract:【Objective】Effects of tillage methods applied for maize cultivation in northern Liaoning on the crop productivity and soil conditions were studied in search of an improved agriculture practice for the region. 【Method】Maize yield and soil properties under various tillage methods were determined in a field experimentation. Means of tillage and ground preparation including (A) rotary tillage for 15 cm, (B) deep loosing tillage for 30cm, (C) smash ridging tillage for 30 cm, (D) smash ridging tillage for 50cm, (E) smash ridging tillage for 30cm combined with film mulching, and (F) smash ridging tillage for 50cm combined with film mulching were evaluated. Ground temperature and bulk density in different layers of soil at different maize growth periods as well as root number, length, and volume and yield of maize plants were monitored. 【Result】Smash ridging tillage on the field increased the ground temperatures in layers of the soil. Significant rises of the soil temperature by 14.14-23.75% in maize seedling stage were observed when the tillage method was applied with film mulching, and by 14.34-25.90% in the maize jointing stage. Smash ridging tillage also reduced the bulk density in 25-30cm layer of soil by 1.91-3.09% at the maize seedling, jointing, and mature stages, and in the 45-50cm layer soil by 2.91-5.21%, while significantly increased the root count by 13.21-47.55%, the root length by 7.14-38.83%, and the root volume by 20.63-110.04% from the maize jointing stage to maturity stage. By covering the ground with a mulching film after smash ridging tillage, maize yield was increased by 11.12-16.29%. And the greatest increase in yield was achieved by using the (C) method with a 30 cm tillage.

【Conclusion】It was preliminarily showed that the smash ridging tillage with film ground cover, especially the method (C),

收稿日期: 2023-06-02 修回日期: 2023-09-12

作者简介: 隋世江 (1978—), 男, 副研究员, 主要从事农业资源利用研究, E-mail: my0708@163.com

* 通信作者: 王娜 (1977—), 女, 研究员, 主要从事农业资源环境研究, E-mail: wnsxh1999@126.com

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2023JH2/101300136); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800901); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303130-02)

could materially benefit not only the soil conditions but also the growth of maize root system and crop yield.

Key words: Maize; tillage patterns; soil properties; crop yield

0 引言

【研究意义】近年来,辽宁省玉米种植面积基本在 $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 以上,是我国重要的粮食生产基地之一,主要分布在铁岭、阜新、朝阳等辽西北地区^[1]。自实施土地承包责任制以来,由于地块分散、狭窄,连年采用小型动力旋耕作业,造成耕层变浅、犁底层变厚和上移等问题,导致土壤透气、透水等理化性能变差,作物根系吸收土壤水分、养分的范围变小,土壤生产能力下降,成为作物产量提高的限制因素^[2]。而耕作在玉米生产中发挥重要作用,直接影响土壤理化性状以及玉米生长和养分吸收^[3-4]。

【前人研究进展】深松耕作是随着保护性耕作而发展起来的一种代替传统翻耕的耕作方式,可松碎土壤而不乱土层,能打破犁底层,降低土壤容重,提高水分入渗深度,利于防风蚀和水蚀^[5-6]。粉垄耕作是一种新型深松深耕土壤的耕作措施,利用“螺旋型钻头”耕作工具垂直入土30~50 cm,高速双向旋磨切割粉碎土壤,使土壤自然悬浮成垄,且不打乱土层,一次性完成传统耕作的犁、耙、打等作业程序,达到播种或种植作物的整地标准,能够较长时间保持耕层相对深松状态^[7-10]。粉垄耕作通过打破坚硬的犁底层,改善土层结构,增加孔隙度,增强了土壤水分入渗能力和蓄水能力,促进作物生长^[11]。何进宇等^[10]研究了粉垄耕作深度对旱区土壤关键物理性质的影响,发现粉垄耕作可达到疏松土壤与提高土壤蓄水保墒能力的效果,通过改善玉米生长条件和土壤环境提高了籽粒产量。张邦彦等^[12]研究发现粉垄结合覆膜措施可显著改善马铃薯耕层土壤结构、水分环境,有利于马铃薯生长发育,其抗旱增产增收效果显著,以粉垄45 cm覆膜处理效果最佳。在甘蔗、烟草、水稻、花生等多种作物上的应用也表明^[13-16],粉垄耕作可有效改善土壤环境,促进根系发育,增加作物产量。**【本研究切入点】**目前粉垄耕作在多种作物栽培上已有较多研究,而在东北地区相关研究较少,尤其在辽北地区更鲜有报道。

【拟解决的关键问题】通过旋耕、深松、粉垄耕作以及结合覆膜等措施比较,研究不同耕作模式对辽北地区玉米田土壤温度、容重、玉米根系生长和产量的影响,明确耕作模式与玉米产量和土壤物理性状的关系,探索适合该区域玉米种植的耕作模式,

为辽宁省玉米增产和土壤耕作提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于辽宁省铁岭市蔡牛镇,属于中温带半湿润季风大陆性气候,是典型辽北半湿润平原旱作农业区。年均降雨量为700 mm,主要集中在6~9月;年均气温为6.3 °C,无霜期为150 d。该地区土壤类型为棕壤,耕层土壤理化性质为容重 1.32 g cm^{-3} 、含水率17.24%、孔隙度50.82%、有机质 18.4 g kg^{-1} 、全氮 1.3 g kg^{-1} 、碱解氮 86.1 mg kg^{-1} 、速效磷 18.9 mg kg^{-1} 、速效钾 129 mg kg^{-1} ,pH值6.0。耕作制度以一季春玉米为主,实行连年浅旋耕。

1.2 试验设计

采用田间试验,按照不同耕作方式,设置6个处理:旋耕15 cm(T1);深松30 cm(T2);粉垄30 cm(T3);粉垄50 cm(T4);粉垄30 cm+覆膜(T5);粉垄50 cm+覆膜(T6)。每个处理3次重复,小区面积 60 m^2 ($10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$)。所有处理均施用复合肥 $[m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=32:11:12]$,施肥量为 750 kg hm^{-2} ,一次性基施。雨养,无灌溉;供试玉米品种为郑单958,种植密度 60000株 hm^{-2} ,于2019年4月28日播种,10月7日收获。耕作均采用农机具作业,其他田间管理同当地一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤温度

在玉米苗期、拔节期、大喇叭口期和灌浆期,采用曲管地温计测定5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm处的土壤温度,测定时间均在上午10:00。

1.3.2 土壤容重

在玉米苗期、拔节期和成熟期,采用环刀法^[17]测定10~15 cm、25~30 cm、45~50 cm土层的土壤容重。

1.3.3 玉米根系

在玉米拔节期、大喇叭口期和成熟期,挖取玉米根系,测量根总长、根总体积和计算根总数(不足0.5 cm不计),其中采用排水法测定根体积(含根茬)。

1.3.4 玉米产量及其构成因素

玉米收获后,每个处理随机取具有代表性的 10 m^2 样区进行测产。每个处理共取30穗,选有代表性的

10穗考种,按常规方法测定行粒数、秃尖长、百粒重等产量构成因素。

1.4 数据处理与分析

采用Excel和SigmaPlot 12.5进行试验数据分析与作图,并采用SPSS 19.0软件对不同处理间的数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 耕作模式对玉米各生育期不同土层地温的影响

土壤温度是影响玉米生长的主要限制因素,尤

其春季播种时地温低,将严重影响玉米出苗。由图1可知,玉米各生育期的土壤温度均随着土层深度的增加而下降。不同耕作措施对玉米各个生育期不同土层地温的影响存在一定差异。在玉米苗期,与T1处理的同层地温相比,T2~T4处理地温分别提高0.96%~3.98%、2.56%~5.97%、3.11%~6.47%,无显著差异;T5和T6处理地温分别显著提高14.14%~20.38%、14.99%~23.75%。与T3处理的同层地温相比,T4处理地温提高0.36%~2.50%,T5处理地温显

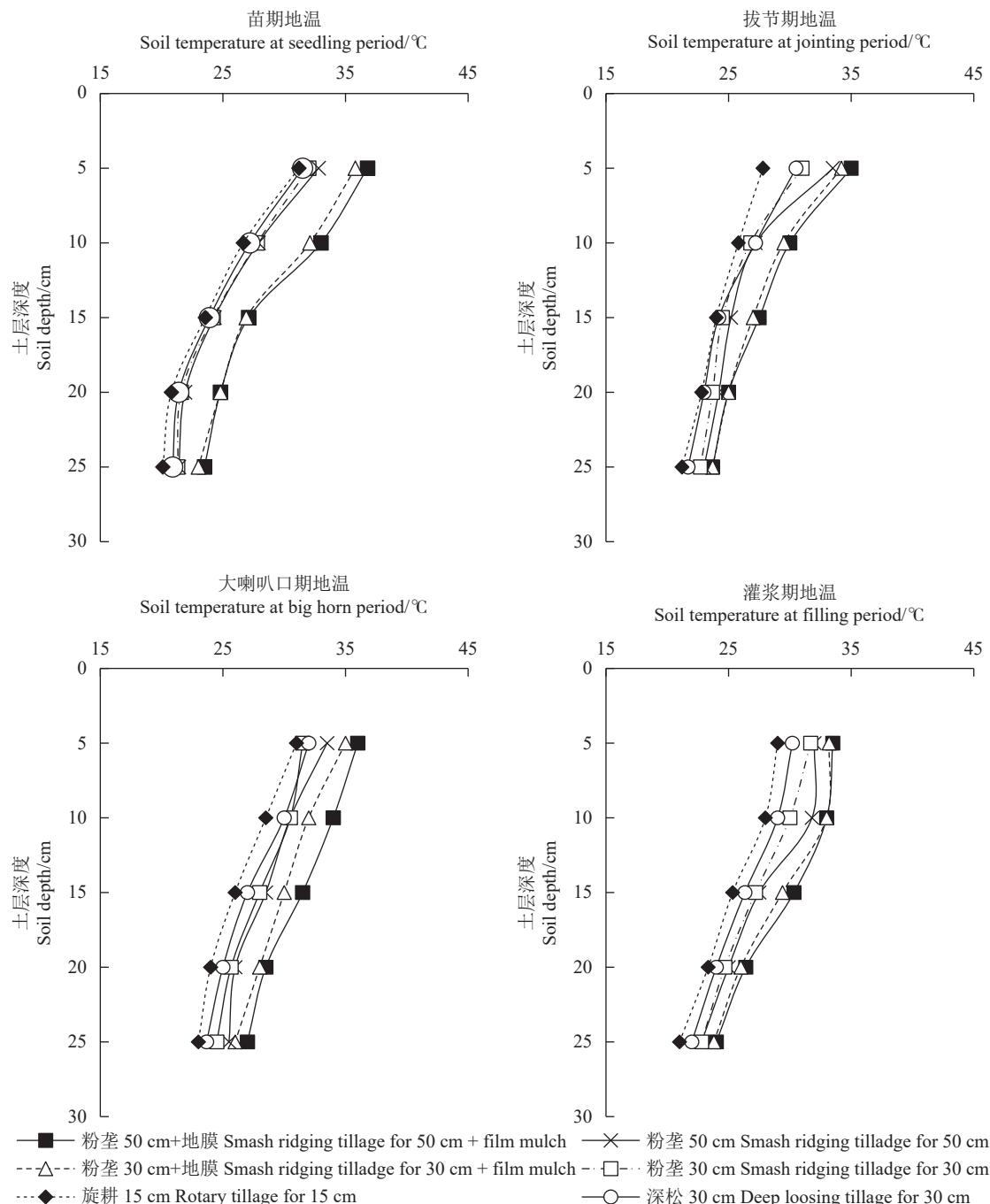


图1 耕作模式对不同层次地温的影响

Fig. 1 Effects of tillage methods on ground temperature at different soil layers

著提高 7.98%~15.47%; 与 T4 处理的同层地温相比, T6 处理地温显著提高 9.81%~18.28%, 表明粉垄耕作有助于提高苗期各层土壤温度, 尤其结合覆膜, 而粉垄耕作深度 30 cm 与 50 cm 对苗期土壤温度影响无显著差异。在玉米拔节期, 与 T1 处理的同层地温相比, T2~T6 处理地温分别提高 0.83%~9.71%、2.08%~11.51%、5.00%~20.50%、9.65%~23.02%、9.65%~25.90%, 其中 T5 和 T6 处理显著提高 5~10 cm 土层的地温 14.34%~25.90%, 表明覆膜有助于提高拔节期的表层土壤温度。在玉米大喇叭口期和灌浆期, 与 T1 处理的同层地温相比, T2~T6 处理的两时期地温分别提高 1.61%~21.15% 和 2.86%~19.74%, 均无显著差异。综上, 说明粉垄耕作能够提高玉米各生育期的不同土层的土壤温度, 其中粉垄耕作结合覆膜措施对于玉米苗期和拔节期土壤增温效果显著。

2.2 耕作模式对玉米各生育期的不同土层容重的影响

土壤容重能够综合反映土壤松紧度。土壤容重越大, 表明土壤越紧实、板结, 土壤退化趋势愈强; 土壤容重小, 则说明土壤疏松多孔, 结构型良好^[18]。不同耕作模式对玉米不同生育期 10~50 cm 土层的土壤容重有不同程度的影响(图 2)。在玉米苗期, T1~T6 处理 10~15 cm 土层的土壤容重变化区

间为 1.276~1.293 g·cm⁻³, 低于同处理 25~30 cm 和 45~50 cm 土层容重 3.84%~5.18% 和 4.23%~7.53%。与 T1 处理同土层相比, T3~T6 处理 10~15 cm 土层的土壤容重降低 0.88%~1.29%, 无显著差异; T3~T6 处理 25~30 cm 土层的土壤容重显著降低 1.91%~2.57%; T4 和 T6 处理 45~50 cm 土层的土壤容重分别显著降低 3.60% 和 4.32%。在玉米拔节期, 不同耕作处理的 10~50 cm 土壤容重较苗期有所增加, 为 1.284~1.42 g·cm⁻³。与 T1 处理同土层相比, T2~T6 处理 10~15 cm 土层的土壤容重降低 1.04%~1.98%, 无显著差异; T3~T6 处理 25~30 cm 和 45~50 cm 土层的土壤容重分别显著降低 1.95%~2.68% 和 2.91%~4.23%。在玉米成熟期, 不同耕作处理的 10~50 cm 土壤容重较拔节期有所增加, 为 1.285~1.44 g·cm⁻³。与 T1 处理同土层相比, T2~T6 处理 10~15 cm 土层的土壤容重降低了 1.29%~2.63%, 无显著差异; T4~T6 处理 25~30 cm 土层的土壤容重显著降低 2.37%~3.09%; T3~T6 处理 45~50 cm 土层的土壤容重显著降低 3.50%~5.21%。综上, 从玉米苗期到成熟期, 土壤容重呈现逐渐增大趋势, 土层越深土壤容重越大; 深松和粉垄处理的土壤容重低于旋耕处理, 尤其土层越深粉垄耕作效果越明显。

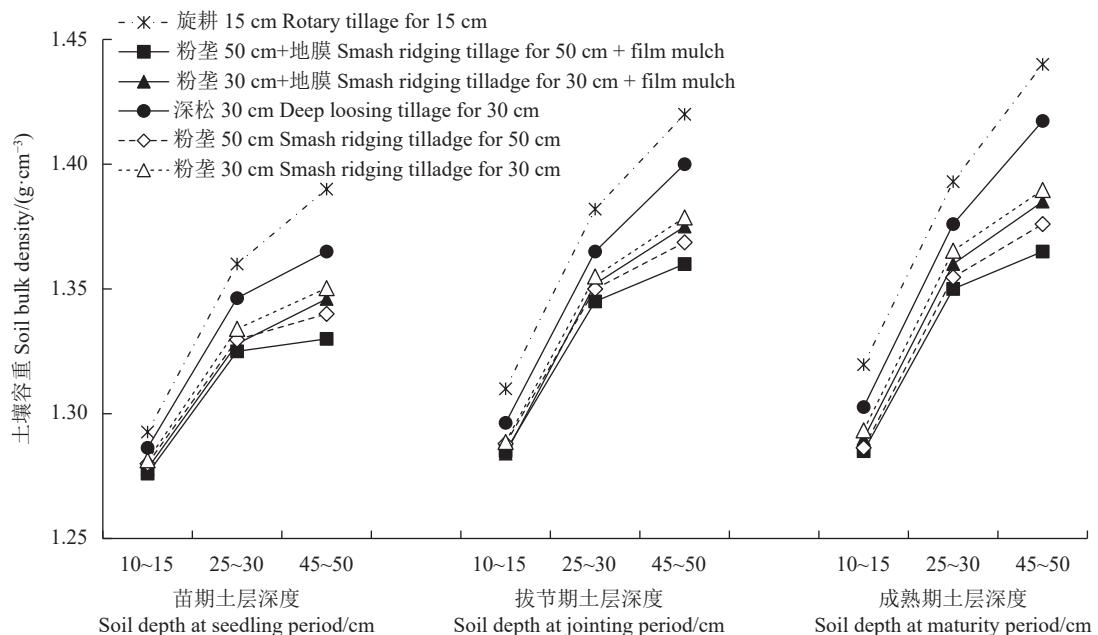


图 2 耕作模式对不同层次土壤容重的影响

Fig. 2 Effects of tillage methods on bulk density of soil at different layers

2.3 耕作模式对玉米各生育期根系的影响

根系是作物吸收养分、水分的重要器官, 根系生长受土壤温度、土壤容重等因素影响, 进而影响作物产量^[19]。如图 3 所示, 不同耕作模式对玉米各

生育期根系生长均有一定促进作用。从玉米拔节期、大喇叭口期到成熟期, 与 T1 处理相比, T3~T6 处理的玉米根数分别显著增加 17.50%~40.00%、20.28%~47.55%、13.21%~36.79%, T5、T6 多于 T3、

T4; T4~T6处理的玉米根长分别显著增加15.13%~38.83%、13.08%~38.25%、7.14%~16.08%，T5、T6长于T3、T4；T3~T6处理的玉米根体积分别显著增加37.39%~69.72%、20.63%~59.09%、57.15%~110.04%，T4、T6多于T3、T5。这表明粉垄耕作结合

覆膜对玉米根系的根数和根长促进作用效果明显，尤其在拔节期、大喇叭口期。而随着玉米植株的生长发育，粉垄耕作深度对玉米根体积的影响差异逐渐显现。

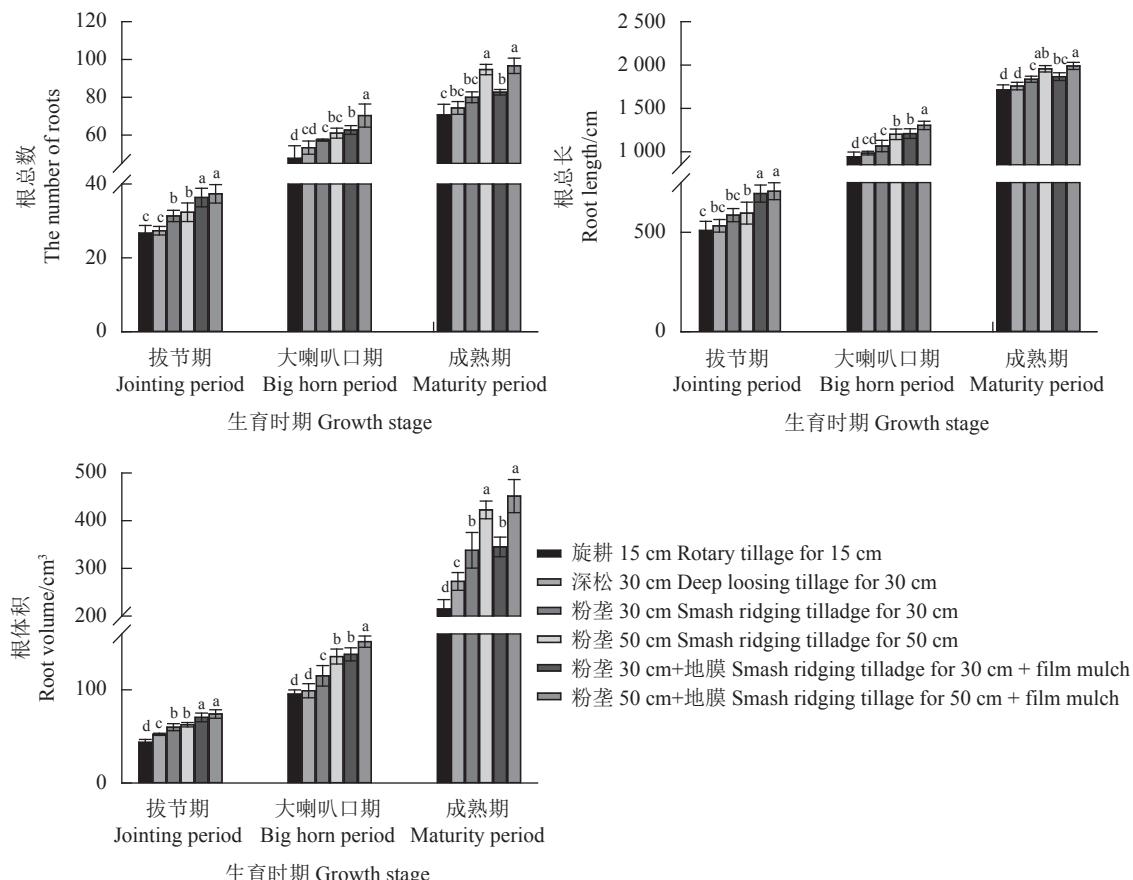


图3 耕作模式对玉米根系状况的影响

Fig. 3 Effects of different tillage patterns on maize root system

2.4 耕作模式对玉米产量及构成因素的影响

不同耕作模式对玉米产量及构成因素的影响存在一定差异（表1）。从产量构成因素来看，与T1处理相比，T2~T6处理的秃尖长显著减小8.66%~

52.15%，行粒数显著增加0.89%~3.20%，其中T5和T6处理的秃尖最短、行粒数最多，T3和T4处理次之。T2~T6处理的百粒重增加0.75%~1.92%，无显著差异。从产量方面来看，T2~T6处理的产量

表1 耕作模式对玉米产量及构成因素的影响

Table 1 Effects of different farming patterns on maize yield and yield components

处理 Treatment	秃尖长 Bare top length/cm	行粒数 Kernels per row	百粒重 100-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
T1	0.21±0.01 a	37.50±0.53 c	37.95±1.44 a	9907.85±315.90 c
T2	0.17±0.01 b	38.20±0.42 b	38.35±2.10 a	10369.31±152.10 bc
T3	0.13±0.01 c	38.40±0.52 ab	38.23±1.88 a	10681.32±571.10 bc
T4	0.13±0.01 c	38.50±0.53 ab	38.42±3.29 a	10412.24±685.31 bc
T5	0.10±0.01 d	38.60±0.52 ab	38.68±1.91 a	11522.08±83.00 a
T6	0.10±0.01 d	38.70±0.48 a	38.67±2.17 a	11009.26±540.85 ab

同列不同字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

The different letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ levels.

增加4.66%~16.29%，其中T5和T6处理产量分别显著增加16.29%和11.12%，T3和T4处理产量分别增加7.81%和5.09%，无显著差异。综上，粉垄耕作T3~T6处理增产效果好于常规旋耕T1处理，表明粉垄耕作有利于辽宁玉米生长，提高玉米产量，尤其结合覆膜，而粉垄耕作深度对玉米生长发育影响差异不大。

3 讨论

土壤温度，受当地气温和土壤物理性质影响。土壤容重增加，孔隙度降低，进而影响土壤温度传递。本试验中，与常规旋耕15 cm处理相比，粉垄耕作结合覆膜处理显著提高玉米苗期和拔节期地温14.14%~25.9%，一是因为这一时期玉米叶片对太阳辐射的阻碍作用较小，表层土壤始终接受太阳直接照射，加上覆膜具有一定保温作用^[20]；另外粉垄耕作显著降低玉米苗期和拔节期25~30 cm、45~50 cm土壤容重1.91%~2.68%、2.91%~4.32%，可促进土壤上层和下层空气交流和气温传递，也提高了深层土壤温度。可见粉垄耕作结合覆膜措施主要通过降低各层土壤容重，提高玉米生育前期土壤温度并促进各土层地温传递，进而促进玉米根系的生长发育，其中拔节期玉米根系的根数和根长分别显著增加17.50%~40.00%和15.13%~38.83%，因此此措施建议应用在玉米播种期和苗期土壤温度较低或风大干旱地区。

随着玉米的生长发育，根系长长，进入深层土壤。有研究表明，容重大的土壤其土层坚硬度大，根系生长时所遇到的阻力大，根系生长速率明显小于容重小的土壤，表现为根径较粗、分布较浅，主要集中在上层，但水平分布角度大^[21~22]。虽然在土壤深层根系的分布较少，但是其在植株全生育期内承担着辅助上层根系吸取和利用土壤中的养分和水分，满足作物后期的生长需要，也提升了作物的抗旱能力。有研究表明，在一定的土壤容重范围内，随着下层土壤容重的增加，玉米根条数、根干重、根长、总根量均减少，根系活力也受到较大影响，限制了养分吸收和产量提高^[23]。尤其在玉米生育后期，由于长期受降雨击打、人为踩踏、机具碾压和土壤自然沉实等因素的影响，土壤紧实度增加，气温传递受阻。另外此时期玉米植株高、叶片多、叶面积大阻碍太阳对表层土壤的辐射作用，加上地膜破损，土壤增温效果不明显，影响了玉米生长发育。在本试验中，10~15 cm土壤容重最小，其次为25~30 cm，45~50 cm土壤容重最大，表明土壤容

重随土层加深而增加，与张凤杰等^[24]研究结果一致。而粉垄耕作能实现土壤深松深度达30~50 cm，显著降低了玉米成熟期25~30 cm和45~50 cm土层的土壤容重2.37%~3.09%和3.50%~5.21%，提高地温2.86%~19.74%，玉米根数、根长和根体积分别显著增加13.21%~36.79%、7.14%~16.08%和57.15%~110.04%，其结合覆膜措施，显著提高玉米产量11.12%~16.29%，其中粉垄30 cm结合覆膜处理产量最高。

4 结论

通过对玉米各生育期得多层土壤温度、土壤容重、玉米根系生长和产量及其构成因素的深入分析，结果表明粉垄耕作主要是通过改善上层和下层土壤容重，促进气温传递；另外结合覆膜措施，提高土壤温度，进而促进根系生长，减少玉米秃尖长度和提高玉米穗粒数，进而促进玉米增产。因此根据当地土壤性质和玉米生长情况，建议辽北地区玉米田可选择粉垄30 cm结合覆膜的耕作措施，即可保证玉米产量，又可减少机械动力损耗，同时也起到松土和保温的作用。依此作为参考，其他地区可根据当地气候条件、耕地情况、农机配套情况以及生产成本、作物根系活动层等选择适宜的耕作方式和深度，以打破连年深度不变的耕作形成的犁底层，为玉米生长提供适宜的土壤环境。本试验仅是根据1年测定数据得到的结果，还需要通过多年定点试验，最终确定适宜的耕作方式，对改善土壤环境，确保玉米高产稳产提供依据。

参考文献：

- [1] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西地区不同种植模式对春玉米产量形成及其生长发育特性的影响 [J]. *作物学报*, 2014, 40 (1): 181~189.
BAI W, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Effect of different planting patterns on maize growth and yield in western Liaoning Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40 (1) : 181~189. (in Chinese)
- [2] 李铁冰, 逢焕成, 李华, 等. 粉垄耕作对黄淮海北部春玉米籽粒灌浆及产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (14) : 3055~3064.
LI Y B, PANG H C, LI H, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on grain filling and yield of spring maize in North Huang-Huai-Hai region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (14) : 3055~3064. (in Chinese)
- [3] CAI H G, MA W, ZHANG X Z, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize [J]. *The Crop Journal*, 2014, 2 (5) : 297~307.
- [4] ZHAI L C, XU P, ZHANG Z B, et al. Improvements in grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize by optimizing tillage practice

- and nitrogen application rate[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(2): 666–676.
- [5] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19 (4): 945–950.
- LIANG J F, QI Q Z, JIA X H, et al. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 (4): 945–950. (in Chinese)
- [6] 张敏, 粟戈璇, 彭曙光, 等. 粉垄深度对山地黄壤理化特性和烤烟养分利用效率的影响 [J]. 作物研究, 2021, 35 (1): 55–60.
- ZHANG M, SU G X, PENG S G, et al. Effects of smashing ridge tillage on physicochemical property of mountain yellow soil and nutrient utilization efficiency of flue-cured tobacco [J]. *Crop Research*, 2021, 35 (1): 55–60. (in Chinese)
- [7] 韦本辉. 旱地作物粉垄栽培技术研究简报 [J]. 中国农业科学, 2010, 43 (20): 4330.
- WEI B H. Brief report on cultivation techniques of dry land crops by powder ridge [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (20): 4330. (in Chinese)
- [8] WEI B H. Fenlong cultivation—the fourth set of farming methods invented in China [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18 (11): 2045–2048, 2052.
- [9] 张柯雨, 陈彦云, 李国旗, 等. 粉垄耕作对盐碱地土壤环境及作物生长的影响研究进展 [J]. 农业科学, 2022, 43 (1): 57–61, 96.
- ZHANG K Y, CHEN Y Y, LI G Q, et al. Research progress on the effects of Fenlong-ridging on soil environment and crop growth in saline-alkali land [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 43 (1): 57–61, 96. (in Chinese)
- [10] 何进宇, 石伟业, 刘飞杨, 等. 粉垄耕作深度对旱区土壤关键物理性质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41 (3): 195–201, 228.
- HE J Y, SHI W Y, LIU F Y, et al. Effects of Fenlong cultivation on soil key physical properties in arid areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41 (3): 195–201, 228. (in Chinese)
- [11] 韦本辉, 刘斌, 甘秀芹, 等. 粉垄栽培对水稻产量和品质的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (19): 3946–3954.
- WEI B H, LIU B, GAN X Q, et al. Effect of fenlong cultivation on yield and quality of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (19): 3946–3954. (in Chinese)
- [12] 张邦彦, 何文寿, 李惠霞, 等. 粉垄与覆膜对宁南旱区土壤物理性状及马铃薯产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40 (2): 27–37.
- ZHANG B Y, HE W S, LI H X, et al. Effects of deep vertically rotary tillage and film mulching on soil physical properties and potato yield in the arid area of Southern Ningxia [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40 (2): 27–37. (in Chinese)
- [13] 赵钧洋, 覃树涛, 常媛, 等. 粉垄耕作促进甘蔗根系生长、养分吸收及增产 [J]. 热带作物学报, 2022, 43 (3): 529–538.
- ZHAO J Y, QIN S T, CHANG Y, et al. Fenlong tillage promotes sugarcane root growth, nutrient absorption and yield increase [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43 (3): 529–538. (in Chinese)
- [14] 熊梓沁, 荆永峰, 贺非, 等. 粉垄深度对稻作烟区土壤理化特性及作物周年产量的影响 [J]. 中国烟草学报, 2021, 27 (3): 46–55.
- XIONG Z Q, JING Y F, HE F, et al. Effect of ridge depth on soil physicochemical and annual crop yield in rice growing tobacco area [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2021, 27 (3): 46–55. (in Chinese)
- [15] 石伟业. 粉垄耕作对土壤理化性质和玉米、水稻生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- SHI W Y. Effects of Fenlong Tillage on Soil Physical and Chemical Properties and Growth of Maize and Rice [D]. Yinchuan: Ningxia University.
- [16] 高伟, 张俊, 郝西, 等. 粉垄耕作对土壤物理性状及花生根系的影响 [J]. 花生学报, 2021, 50 (4): 67–71, 86.
- GAO W, ZHANG J, HAO X, et al. Effect of smash-ridging on soil physical properties and peanut growth [J]. *Journal of Peanut Science*, 2021, 50 (4): 67–71, 86. (in Chinese)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 等. 农田土壤紧实度研究进展 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (1): 226–232.
- YANG S Q, WU H J, HAN R Y, et al. A review of soil compaction in farmland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47 (1): 226–232. (in Chinese)
- [19] 程帅, 李鹏程, 刘志刚, 等. 密度、氮肥对玉米杂交种节根数量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (4): 1118–1125.
- CHENG S, LI P C, LIU Z G, et al. Effect of plant density and nitrogen supply on nodal root number of maize of different varieties [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (4): 1118–1125. (in Chinese)
- [20] 孙仕军, 许志浩, 张旭东, 等. 地膜覆盖对玉米田间土壤含水率和地温变化的影响 [J]. 玉米科学, 2015, 23 (3): 91–98.
- SUN S J, XU Z H, ZHANG X D, et al. Effect of film mulching on soil moisture and soil temperature in eastern inner Mongolia rain-fed black soil area [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23 (3): 91–98. (in Chinese)
- [21] BENGOUGH A G, YOUNG I M. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances [J]. *Plant and Soil*, 1993, 149 (1): 129–139.
- [22] COELHO E F, OR D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation [J]. *Plant and Soil*, 1999, 206 (2): 123–136.
- [23] 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (8): 1706–1711.
- LI C H, LI S L, WANG Q, et al. A study on corn root growth and activities at different soil layers with special bulk density [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (8): 1706–1711. (in Chinese)
- [24] 张凤杰, 孙继颖, 高聚林, 等. 春玉米根系形态及土壤理化性质对深松深度的响应研究 [J]. 玉米科学, 2016, 24 (6): 88–96.
- ZHANG F J, SUN J Y, GAO J L, et al. Response of spring maize root morphological characteristics and soil physicochemical properties to chiseling depth [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24 (6): 88–96. (in Chinese)