

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.032.

郑培峰, 张晓龙, 司雨, 等. 深松对三江平原春玉米田土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 297-303.

ZHENG Peifeng, Zhang Xiaolong, SI Yu, et al. Effects of Subsoiling on Soil Moisture and Yield of Spring Maize Fields in the Sanjiang Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 297-303.

# 深松对三江平原春玉米田土壤水分和产量的影响

郑培峰<sup>1,2</sup>, 张晓龙<sup>1,2</sup>, 司雨<sup>1,2</sup>, 吕艳杰<sup>2</sup>, 王立春<sup>2</sup>, 王永军<sup>1,2</sup>

(1.吉林农业大学 农学院, 长春 130118; 2.吉林省农业科学院资源与环境研究所/玉米国家工程实验室, 长春 130033)

**摘 要:**为探明不同方式深松对三江平原春玉米田土壤水分及产量的影响,在黑龙江省农业科学院佳木斯分院试验基地开展田间深松试验。试验设置2个深松深度(30 cm, 40 cm), 3个深松时期(上年秋季, QS; 当年春季, CS; 和当年夏季, XS), 以常规旋耕处理为对照(CT15)共7个深松处理, 对比分析了不同深松方式对土壤水分、玉米农艺性状及玉米产量的影响。结果表明: 40 cm深松效果优于30 cm, 0—10 cm土层中XS40和QS40土壤含水量在播种(VE)和吐丝期(R1)显著高于CT15, 分别高29.17%和9.25%, 21.02%和12.94%; 20—35 cm土层中, QS40在拔节期(V6)和R1分别较CT15高11.76%和7.82%。深松对株高、穗位高和绿叶期具有积极作用, 但不同深松处理间差异较小。与CT15相比, QS30植株高度降低5.53%; CS40和XQS40与CT相比, 其穗位高分别降低6.67%和10.98%; 成熟期各处理绿叶数出现差异, 以QS30, QS40和XS30作用效果显著, 较CT分别高34.85%, 48.02%和15.12%。深松可降低秃尖长度, 增加穗粒数以提高玉米产量; 以QS40处理表现最佳, 与CT相比, 其秃尖长度下降56.60%, 穗粒数和籽粒产量分别较CT15显著增加14.67%和10.26%。综上, 30 cm和40 cm深松土壤均可提高土壤水分含量, 延长绿叶期, 增加产量, 40 cm深松效果较为明显; 深松在秋季表现最佳, 春季和夏季次之。秋季40 cm深松可提高0—50 cm土壤含水量, 增加穗粒重, 提高产量; 是众多深松组合中最优方案, 对合理确定三江平原春玉米田深松方案具有一定技术参考。

**关键词:**深松; 三江平原; 春玉米; 土壤水分; 产量

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0297-07

## Effects of Subsoiling on Soil Moisture and Yield of Spring Maize Fields in the Sanjiang Plain

ZHENG Peifeng<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaolong<sup>1,2</sup>, SI Yu<sup>1,2</sup>, LYU Yanjie<sup>2</sup>, WANG Lichun<sup>2</sup>, WANG Yongjun<sup>1,2</sup>

(1.Faculty of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agriculture Sciences/State Engineering Laboratory of Maize, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To investigate the effects of different methods of subsoiling on soil moisture and yield of spring maize fields in the Sanjiang Plain, a field subsoiling experiment was conducted at the experimental base of Jiamusi Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences. The experiment was conducted at two depths (30 cm and 40 cm) and three periods (QS in the previous autumn, CS in the spring and XS in the summer), with conventional rototill treatment as the control (CT15). The results showed that the effect of 40 cm subsoiling was better than that of 30 cm, and the soil moisture contents of XS40 and QS40 in 0—10 cm soil layer were significantly higher than those of CT15 at the seeding stage (VE) and spatulation stage (R1), 29.17% and 9.25%, 21.02% and 12.94%, respectively; in 20—35 cm soil layer, QS40 was higher than that of CT15 at the spatulation stage (V6) and R1, 11.76% and 11.76%, respectively; the soil moisture contents of QS40 in jointing stage (V6) and silking stage (R1) was 11.76% and 7.82% higher than those of CT15 in 20—35 cm soil layer; deep mowing had positive effects on plant height, spike height and green leaf stage, but the differences between different deep mowing treatments were small; compared with CT15,

收稿日期: 2021-08-05

修回日期: 2021-11-16

资助项目: 吉林省农业科技创新工程(CXGC2017JQ006); 国家自然科学基金(U19A2035, 31701349); 国家玉米产业技术体系(CARS-02-16)

第一作者: 郑培峰(1998—), 男, 山东邹城人, 硕士研究生, 研究方向玉米生理生态。E-mail: zclanhao@163.com

通信作者: 王永军(1977—), 男, 山东诸城人, 研究员, 博士生导师, 研究方向玉米生理生态。E-mail: yjwang2004@126.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

QS30 reduced plant height by 5.53%, CS40 and XQS40 reduced spike height by 6.67% and 10.98%, respectively; compared with CT, the number of green leaves at maturity differed among treatments, with QS30, QS40 and XS30 having significant effects, 34.85%, 48.02% and 15.12% higher than CT, respectively; the QS40 treatment showed the best performance, with 56.60% decrease in bald tip length, 14.67% increase in number of ears and 10.26% increase in seed yield compared with CT15. In conclusion, both 30 cm and 40 cm deep soil loosening can improve soil moisture content, prolong the green leaf period and increase yield, and 40 cm subsoiling has more obvious effects; subsoiling performs best in autumn, followed by spring and summer. The 40 cm subsoiling in autumn can improve the soil moisture content of 0—50 cm, increase the grain weight of ears and improve the yield, and is the best solution among many subsoiling combinations and has some technical reference to reasonably determine the subsoiling solution for spring maize fields in the Sanjiang Plain.

**Keywords:** subsoiling; Sanjiang Plain; spring maize; soil moisture; yield

三江平原位于黑龙江省东北部,由松花江、乌苏里江和黑龙江三江冲积形成,是我国重要的商品粮生产基地。玉米作为当地主要作物之一,近年来种植面积不断增加,对稳定地区粮食生产安全至关重要<sup>[1-3]</sup>。当前,三江平原玉米生产主要面临着农业用水紧张和土壤退化的双层压力<sup>[4-7]</sup>。研究表明,1955—1999年三江平原地区年降水量呈减少趋势<sup>[8]</sup>,水分蒸散量逐年增加<sup>[4]</sup>。同时湿地转化农田过程加快,农作物(水稻)面积增加带来农业灌溉用水增加<sup>[2-3]</sup>,导致水资源供需矛盾突显。在农业生产上长期采用以旋代耕的土壤耕作方式,形成不合理耕层结构,影响土壤中水分、热量和气体的传递,制约玉米生长发育和高产高效<sup>[6-7]</sup>。因此,缓解水资源供需矛盾,消除玉米农田土壤障碍,已成为三江平原玉米生产亟待解决的关键问题。合理有效的耕作方法是实现土地保护与改良的重要措施<sup>[9]</sup>,选用适当的耕作方法可以加速地表水的渗入,减少无效蒸发<sup>[10-11]</sup>。相反,不合适的耕作方法可以减少地表水渗透,加速无效蒸发,影响根系向下生长,降低作物产量<sup>[12]</sup>。以往农田生产中大多采用常规表层旋耕,造成土壤透水保水性能差<sup>[13]</sup>,影响作物正常生长。采用保护性耕作可缓解这一状况,有效减少土壤侵蚀,提高水分利用效率以及土壤结构的稳定性<sup>[14]</sup>。深松是保护性耕作的关键措施,对减轻农田土壤结构障碍,提升土壤生产力具有良好的效果<sup>[15-16]</sup>,被众多学者公认为构建合理耕层结构的有效改土技术<sup>[17]</sup>。目前,关于深松对农田土壤及作物的研究大都集中于土壤结构、水分、作物根系发育和养分循环等方面<sup>[18-22]</sup>。研究表明,农田土壤经过深松后,土壤疏松多空隙,使得作物根系下扎伸长,增强了根系对深层土壤养分和水分的吸收能力,促进作物生长<sup>[23-25]</sup>。Nidia等<sup>[26]</sup>和尹宝重等<sup>[27]</sup>研究表明,深松可显著增加土壤贮水量,提升土壤有效供水能力;提高作物生长期阶段对深层水分的利用吸收,增加农田

土壤水分消耗量和蒸散量<sup>[28]</sup>。深松可提高表层土壤碳氮含量及根际土壤酶活性,加快秸秆腐殖质分解,促进作物对营养元素吸收转化,进而提高作物产量<sup>[29-30]</sup>。此外,研究人员针对深松深度和时期开展了系列研究,主要集中在不同时期深松或不同深度深松对土壤改良和作物生长的单一效应。阎晓光等<sup>[31]</sup>研究深松时期对旱地春玉米水分利用状况和产量影响表明,与夏季深松相比,秋季深松和春季深松能增加根系对土壤水分的获取,促进玉米干物质积累,提高产量;刘战东等<sup>[32]</sup>研究也表明相同灌溉模式下,秋季深松相比夏季深松,对作物光合能力的提高具有积极效应。关于深松深度研究中,程思贤等<sup>[33]</sup>通过设置30 cm,40 cm,50 cm和60 cm 4个深松深度对比发现,深松深度在30—40 cm对土壤改善和作物生长最为适宜;王亮等<sup>[28]</sup>也表明深松40 cm是南疆绿洲滴灌棉田适宜的深松深度。以上研究多集中在单一深松限定因子,针对三江平原草甸黑土环境条件下,有关不同时期和深度复合效应对玉米田土壤环境、耗水特性及作物生产的系统性研究不足。因此,本研究在前人研究的基础上,设置深松时期和深松深度二因素交互试验,深松时期设定为秋季、春季和夏季;深松深度设置30 cm和40 cm 2个深度,以期探明深松时期和深松深度复合效应对三江平原玉米农田土壤水分利用、玉米生长及产量的影响,揭示深松扩容增产机理,为构建三江平原玉米农田适宜的耕层结构及深松技术的合理应用提供理论依据和实践经验。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于黑龙江省农业科学院佳木斯分院试验基地(46°47'N,130°24'E;海拔111.3 m),该地区年日照时数2 525 h,常年平均气温3.0℃,年最低气温-35℃,最高气温38.1℃,≥10℃活动积温2 590℃,

无霜期 130 d,2015 年生长期降雨量及平均温度见图 1。试验地土壤为草甸黑土,土壤有机质含量 2.49%,碱解氮含量 86.3 mg/kg,有效磷含量 64.6 mg/kg,速效钾 79.9 mg/kg,全氮含量 0.14%,全磷含量 0.14%,全钾含量 3.12%,pH 值为 6.5,前茬作物为玉米,种植模式为一年一熟制。

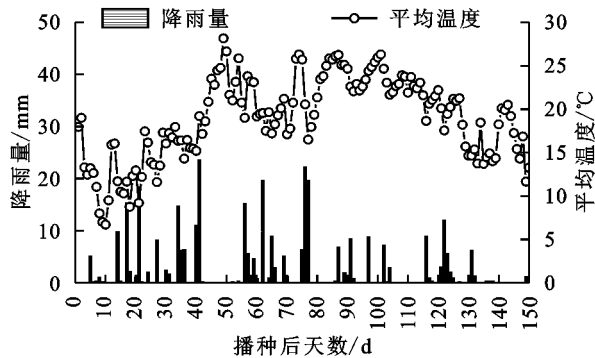


图 1 玉米生育期气象条件

## 1.2 试验设计

试验于 2015 年 4 月至 11 月进行,采取双因素随机区组设计,以常规表层旋耕 15 cm 为对照(CT15),深松深度设定为 30 cm 和 40 cm 2 个深度,深松时期设定为上一年秋季(10 月 20 日),当年春季(4 月 15 日)和当年夏季(6 月 20 日)3 个时期,共 7 个处理,分别为常规 15 cm 旋耕(CT15),秋季 30 cm 深松(QS30)、春季 30 cm 深松(CS30)、夏季 30 cm 深松(XS30)、秋季 40 cm 深松(QS40),春季 40 cm 深松(CS40)和夏季 40 cm 深松(XS40)。每个处理重复 3 次,共 21 个小区,小区面积为 400 m<sup>2</sup>(长 40 m,宽 10 m)。供试玉米品种为先玉 335,行距 65 cm,密度为 6.15 万株/hm<sup>2</sup>,于 2015 年 4 月 28 日播种,2015 年 9 月 28 日收获。试验过程采用机械化作业,采用弯刀式深松机对处理小区进行精准行间深松,深松宽度 12 cm。试验区采用喷灌方式,在播种后喷灌 35 mm,各小区灌溉量相同,试验区周围设置保护行,其他农事管理措施同周边大田。

## 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水量测定 采用土钻钻土烘干法测定<sup>[34]</sup>。在玉米出苗(VE),3 叶期(V3)、拔节期(V6),吐丝期(R1)和成熟期(R6),用土钻于各小区行间钻取 0—10 cm,10—20 cm,20—35 cm 和 35—50 cm 土层土样,置于铝盒中称取鲜土质量,称完后置于 80℃烘箱中烘干至恒重,烘干后称取干土重量并记录。各小区内 3 次平行测定,取平均值计算土壤质量含水率。试验期间降雨量与灌溉量在 50 cm 土层未发生渗漏与形成径流。

土壤含水量(%)=(湿土质量—烘干土质量)/烘

干土质量×100%

1.3.2 株高、穗位高测定及绿叶数调查 每个小区选取生长发育一致、叶片无病斑和破损的植株 5 株,用标签卡片进行标记,在 R1+30 d 和 R6 期,测定植株绿叶数(绿色区域面积占总叶面积≥50%);在玉米 R6 期,测定其株高和穗位高(植株基部到雄穗最高处的距离即为该植株的株高,植株基部到穗位节的高度即为穗位高)。

1.3.3 产量及构成因素测定 在玉米 R6 期,每个小区选择中间 4 行,连续测 10 m,记录株数、穗数、倒伏率、收回全部果穗称重并数个数,按照均值法取 20 个果穗考种,折算成标准含水量(14%)的产量,同时测定穗粒数、含水率,百粒重等指标。

## 1.4 数据处理与分析

试验数据处理及统计分析采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件进行,运用 Origin 28 作图,不同处理间多重比较采用 Duncan 新复极差法,经 t 检验( $p < 0.05$ )。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同时期和深度深松对玉米农田土壤含水量的影响

同一土层深度,除 VE 期因播种灌溉外,各处理土壤含水量变化基本与当地降雨量变化相一致,基本呈现先降低后升高的趋势,R1 期含水量最低(图 2)。0—10 cm 和 10—20 cm 土壤含水量变化幅度较大,20—35 cm 和 35—50 cm 土壤含水量变化较为稳定。0—10 cm 土壤,各处理含水量在 VE 期和 R1 期差异显著,其中 XS40 和 QS40 土壤含水量在 VE 期和 R1 期显著高于 CT15,分别高 29.17%和 9.25%,21.02%和 12.94%。10—20 cm 土壤含水量在各时期均高于 0—10 cm,以 XS40 和 QS40 作用效果明显,在 VE 期和 R1 期与 CT15 相比,分别高 22.67%和 18.25%,8.18%和 6.39%。20—35 cm 各处理土壤含水量变化与 CT15 变化保持相对一致,在各时期基本高于 CT15,且在 VT 期和 R1 期与 CT15 差异显著。35—50 cm 土壤,各处理在 VT 期、R1 期和 R6 期土壤含水量均高于 CT15,在 VT 期作用效果最佳。

深松有利于减少土壤水分的散失,保持土壤水分稳定。深松深度对 VE 期 0—20 cm,V6 期和 R1 期 20—50 cm 土壤含水量影响显著,对 V3 期和 R6 期各层土壤含水量无显著影响;不同时期深松及不同深度和时期深松交互作用主要对 VE 期和 V3 期 10—20 cm,20—35 cm 和 35—50 cm 土壤含水量影响显著(表 1)。

## 2.2 不同时期和深度深松对玉米农艺性状的影响

由图 3 可知,QS30 对 R6 期玉米株高存在显著影

响,与 CT15 相比,QS30 处理植株高度降低 5.53%;CS40 和 XQS40 处理成熟期玉米穗位高与 CT15 有显著差异,与 CT15 相比,分别降低 6.67%和 10.98%( $p<0.05$ )。方差分析结果显示,深松深度对株高影响极显著。深松深度和时期交互作用对穗位高影响显著(表 2)。吐丝后 30 d,除 CS30 外,其绿叶数与 CT15 相比无显著差异,成熟

期各处理绿叶数差异显著,较 CT15 均有不同程度延迟黄叶、落叶效果,其中以 QS30,QS40 和 XS30 作用效果显著,较 CT15 分别高 34.85%,48.02%和 15.12%( $p<0.05$ )。方差分析结果表明,不同时期深松对 R1+30 d和 R6 期绿叶数有显著影响,不同深度深松及二者交互作用影响不显著(表 2)。

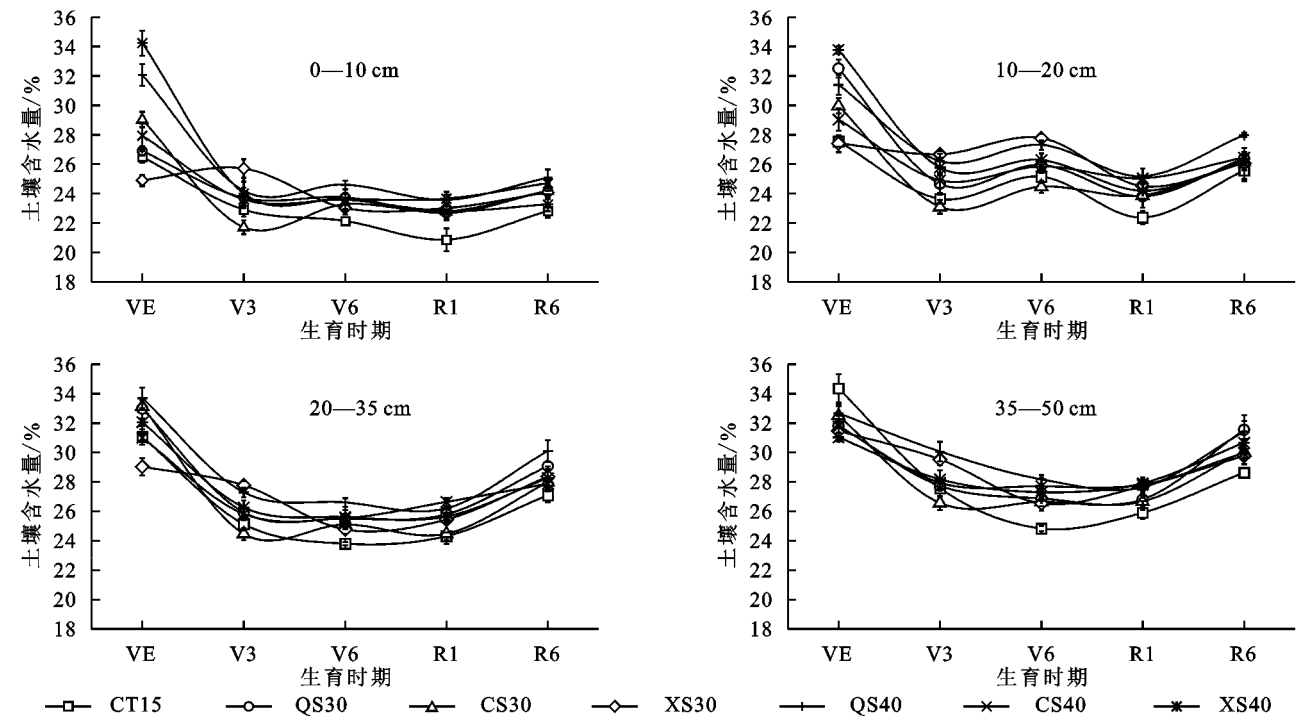


图 2 不同时期和深度深松对生育期不同土层含水量的影响

表 1 不同时期和深度深松对土壤含水量影响方差分析				
时期	测定深度/cm	深度	时期	深度×时期
VE	0—10	* *	ns	* *
	10—20	*	* *	* *
	20—35	ns	* *	* *
	35—50	ns	ns	ns
V3	0—10	ns	*	ns
	10—20	ns	* *	*
	20—35	ns	* *	* *
V6	35—50	ns	* *	* *
	0—10	ns	ns	ns
	10—20	*	ns	ns
R1	20—35	*	ns	ns
	35—50	*	ns	ns
	0—10	ns	ns	ns
R6	10—20	ns	ns	ns
	20—35	ns	*	ns
	35—50	ns	ns	ns

注:ns 表示不显著;\* 表示在 5%水平差异显著;\* \* 表示在 1%水平差异显著,下同。

2.3 不同时期和深度深松对玉米产量及产量构成的影响

不同时期和深度深松对玉米秃尖长度、有效穗数、穗粒数、百粒重和籽粒产量的影响见表 3。各处理籽粒产量相较于 CT15 均有不同程度提高。QS30,CS30,XS30,QS40,CS40 和 XS40 各处理籽粒产量分别较 CT15 增加 5.13%,1.28%,3.85%,10.26%,7.69%和 5.13%,QS40 籽粒产量最高。40 cm 相较 30 cm 深松对提高产量具有较好效果,同一时期下,QS40,CS40 和 XS40 处理较 QS30,CS30,XS30 分别增加 4.88%,6.33%和 1.23%;同一深度,秋季深松与春季和夏季深松相比,产量均得到增加,QS30 和 QS40 分别较 CS30,XS30 和 CS40,XS40 增加 3.66%,1.22%和 2.33%,4.65%。秋季和春季深松对缩短秃尖长度取得较好效果,QS30,CS30,QS40 和 CS40 与 CT15 相比,其秃尖长度分别降低 49.06%,37.74%,56.60%和 30.19%。产量构成方面,收获穗数和百粒重各处理彼此间差异不显著,QS30,QS40 和 CS40 处理穗粒数显著高于 CT15,分别高 11.94%,14.67%和 11.55%。方差分析表明,深松时期和深松深度均对籽粒产量影响显著,其中深松时期对籽粒产量影响极显著,深松深度对秃尖影响显著。



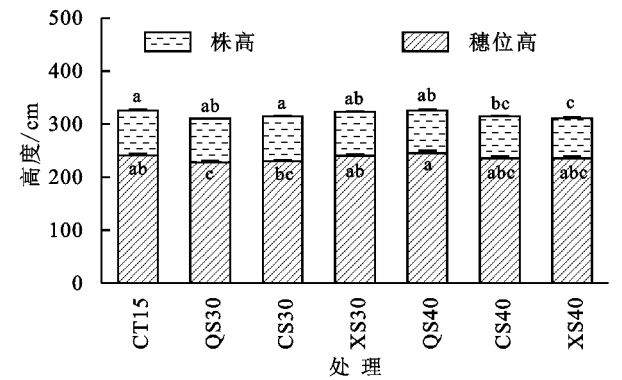


图 3 不同时期和深度深松对玉米相关农艺性状的影响

表 2 深松对玉米农艺性状方差分析

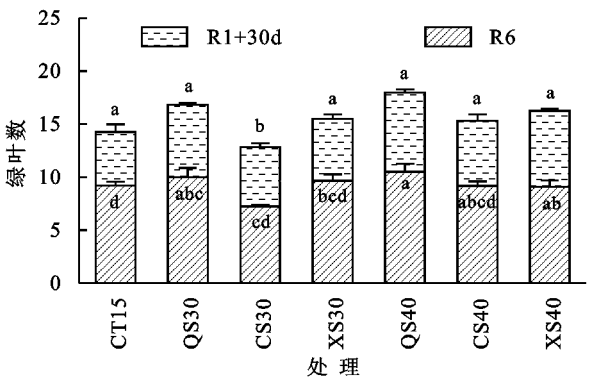
指标	F 值和显著性		
	深度	时期	深度×时期
穗位高	4.452ns	1.227ns	5.002 *
株高	23.901 **	3.790ns	2.235ns
R1+30d 绿叶数	1.546ns	5.640 *	2.095ns
R6 期绿叶数	8.056ns	6.045 *	0.637ns

表 3 不同时期和深度深松对玉米产量及其构成因数的影响

处理	秃尖/cm	收获穗数/ (×10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数	百粒重/g	籽粒产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
CT15	0.53±0.03a	6.0±0.02a	358.5±10.84b	35.7±1.21a	7.8±0.08e
QS30	0.27±0.03bc	5.9±0.06a	401.3±11.15a	34.4±0.58a	8.2±0.12bc
CS30	0.33±0.03bc	5.9±0.04a	380.3±13.84ab	35.1±1.30a	7.9±0.06de
XS30	0.43±0.03ab	6.0±0.02a	380.3±12.28ab	35.4±1.41a	8.1±0.05cd
QS40	0.23±0.03c	5.9±0.09a	411.1±12.49a	35.2±0.87a	8.6±0.11a
CS40	0.37±0.09bc	6.0±0.06a	399.9±5.28a	35.2±0.49a	8.4±0.05ab
XS40	0.43±0.07ab	5.9±0.03a	383.5±7.58ab	36.5±0.62a	8.2±0.07bc

注: 同列不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。

土壤水分是植物获取水分的重要来源,与玉米生长发育息息相关。研究表明,深松可通过改变土壤结构,促进水分入渗,提高土壤深层含水量<sup>[26-28]</sup>。本文研究结果与之相同,深松可提高土壤水分含量,以 10—50 cm 土壤含水量最为明显。深松 40 cm 整体上优于深松 30 cm,且深松深度主要影响玉米 V6 期和 R1 期 20—35 cm 和 35—50 cm 土壤含水量;相关研究已表明,深松深度的增加,会扩大土壤疏松层,从而增加土壤水分含量<sup>[28]</sup>,这与本文结果相一致,但也有部分研究认为当深松深度过大时会造成水分供需失衡<sup>[26]</sup>,作物无法有效吸收土壤水分,农田耗水量降低<sup>[25]</sup>,造成不同生态区域深松差异的原因可能与取样时期,当地气候条件和土壤类型有关,有待进一步验证。本文结果显示,秋季深松效果优于春季深松和夏季深松,对 VE 期 10—35 cm 和 V3 期 0—50 cm 土壤含水量影响显著;这与阎晓光等<sup>[31]</sup>的结果相一致,春季和夏季深松与秋季深松相比,水分蒸发加剧,



3 讨论与结论

采用玉米连作的三江平原春玉米田地区,近些年一直采用播前旋耕的机械耕作方式,导致土壤在亚表层形成紧实的犁底层,影响到当地农业的可持续发展。采用深松可改善土壤质量,改良土壤结构,打破犁底层,增加土壤的通透性,对稳定和提升作物产量具有重要作用。

此外,夏季深松过程中会对作物根系造成伤害,减弱了根系对土壤水分的吸收能力。试验结果显示, QS40 处理深松效果最佳,显著提高 V6-R6 期土壤含水量;以 R1 期为例,与 CT15 相比,其在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—35 cm 和 35—50 cm 土壤含水量分别高 12.94%, 6.39%, 7.81% 和 6.69%。

V6 期至 R1 期是玉米需水的关键时期,试验结果中,深松后 20—35 cm, 35—50 cm 土壤水分变化相对稳定,其土壤水分含量高于 0—20 cm,在 V6 期至 R1 期未出现明显下降,与 CT15 存在明显差异;造成这种情况的原因或是, 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤,经深松后土层疏松层加厚,产生输送土壤水分入渗的有效通道,增加水的渗透能力<sup>[35-36]</sup>,同时气温升高,土壤表层水分蒸发剧烈,加之玉米处于需水旺盛期,虽发生降雨,但作用较小,因而 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤水分呈现下降趋势; 20—35 cm, 35—50 cm 土壤经过深松后,质地变得松软,水分运动阻力减弱,随着气温逐渐回暖,土壤水分蒸发加剧,土壤水分

供给与消耗能力明显增强,造成在 V6 期和 R1 期 20—35 cm, 35—50 cm 土壤水分含量略微下降, CT15 上升。因此,当季节性降雨分布与作物需求不一致时,深松可为当季作物保留更多的深层土壤水分,供给下一阶段作物生长使用<sup>[37]</sup>。

深松可促进深层根系生长发育,提高农作物产量<sup>[27,38]</sup>。玉米 R1 期后,延长绿叶期,有助于植株有机物积累;叶片是植物光合作用的场所,可反映植株的光合能力。深松可延缓作物衰老过程<sup>[39]</sup>。比较试验处理玉米株高、穗位高和绿叶数等指标发现, QS30 可在保持穗位高的前提下,有效降低植株高度,而 CS40 和 XS40 与之相反,即可在保持植株高度的基础上,降低植株穗位高度; QS30, QS40 和 XS30 较 CT15 均有不同程度延迟黄叶、落叶效果。统计结果表明,深松并没有改变玉米物候期,这表明各深松株高、穗位高和绿叶数的变化并不是由于物候期变化而引起,可能是由于深松改善了农田耕层的疏松状况,利于根系深扎和水肥的调动利用,提高了玉米生长所需水肥的持续供应能力,从而对玉米发育产生良好效应。

深松可通过改善土壤结构,影响作物根区环境,促进其根系对水分和养分的吸收,有效地提高植物地上部分的水分和养分供应<sup>[40-41]</sup>。对作物生产潜能具有积极作用<sup>[42]</sup>。试验结果显示,深松与常规旋耕相比,玉米穗粒数显著提高,使玉米籽粒产量增加<sup>[43]</sup>。深松深度增加,可以提高穗粒数、百粒重和籽粒产量,深松时期对玉米籽粒产量产生积极影响,随着深松时期的推延,果穗秃尖长度和百粒重呈现出逐渐增大的趋势,穗粒数和籽粒产量呈现下降趋势。多重比较发现,40 cm 深松相较于 30 cm 深松对产量提升效果显著,同一时期下, QS40, CS40 和 XS40 处理较 QS30, CS30, XS30 分别增加 4.88%, 6.33% 和 1.23%, 与 Kuang 等<sup>[36]</sup>和 Wang 等<sup>[44]</sup> 研究结果相一致;玉米产量间的差异可能是由于耕作深度对土壤颗粒结构的影响,减少了根系生长的空间阻力,提高了玉米对地上部水分和养分供应能力<sup>[45]</sup>,同时玉米根系吸收养分的主要耕层集中在 0—40 cm, 30 cm 深松和 40 cm 深松的差异对玉米根系吸收养分区间影响较大,因而彼此对产量的影响具有显著差异。基于试验结果,可以发现深松深度对玉米产量正调节效应可能存在某种正相关或者线性关系;秋季深松较其他季节效果最佳。

综上,秋季 40 cm 深松可有效保持土壤水分稳定,在各生育时期均起到保水蓄墒的作用,30 cm 和 40 cm 深松均提高土壤水分含量,保水蓄墒,延长绿叶期,促进光合产物及产量形成,但 40 cm 深松效果更加明显;深松时期在秋季表现最佳。综合试验分析得出,秋季 40 cm 深松是三江平原春玉米实现提质增产的最佳深松组合。

感谢国家玉米产业技术体系佳木斯站为本试验顺利进行提供帮助。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [2] 刘珍环,唐鹏钦,范玲玲,等.1980—2010 年东北地区种植结构时空变化特征[J].中国农业科学,2016,49(21):4107-4119.
- [3] 杜国明,张扬,李全峰.21 世纪以来三江平原农作物种植结构演化研究[J].农业现代化研究,2019,40(5):736-744.
- [4] 冯飞,姚云军,张彦彬,等.基于 MOD16 产品的三江平原蒸散量时空分布特征分析[J].生态环境学报,2015,24(11):1858-1864.
- [5] 王静,杨晓光,李勇,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化 VI. 黑龙江省三江平原地区降水资源变化特征及其对春玉米生产的可能影响[J].应用生态学报,2011,22(6):1511-1522.
- [6] Bai W, Sun Z X, Zheng J M, et al. The combination of subsoil and the incorporation of corn Stover affect physicochemical properties of soil and corn yield in semi-arid China [J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 2016,98(5/6):561-570.
- [7] 王永军,吕艳杰,刘慧涛,等.东北春玉米高产与养分高效综合管理[J].中国农业科学,2019,52(20):3533-3535.
- [8] 闫敏华,邓伟,马学慧.大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化[J].地理学报,2001,56(2):159-170.
- [9] 刘登高,张小川,崔永,等.东北黑土地保护问题的调查报告[J].中国农业资源与区划,2004,25(4):19-22.
- [10] Vita D P, Paolo E D, Fecondo G, et al. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy [J]. Soil and Tillage Research, 2007,92(1):69-78.
- [11] Sun J Y, Wang Y M, Ma Y H, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics [J]. Advances in Engineering Software, 2018,119:30-37.
- [12] Bogunovic I, Pereira P, Kisić I, et al. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagno sols(Croatia)[J]. Catena, 2018,160:376-384.
- [13] Van Wie J B, Adam J C, Ullman J L. Conservation tillage in dryland agriculture impacts watershed hydrology [J]. Journal of Hydrology, 2013,483:26-38.
- [14] 何进,李洪文,高焕文.中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J].农业工程学报,2006,22(10):62-67.
- [15] Comia R A, Stenberg M, Nelson P, et al. Soil and crop responses to different tillage systems [J]. Soil and Tillage Research, 1994,29:335-355.
- [16] 崔建平,程强,陈平,等.深松条件下滴灌频次对土壤理化指标及棉花产量的调节效应[J].水土保持学报,2019,33(1):263-269,276.

- [17] Shao Y H, Xie Y X, Wang C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rain fed dryland regions of North China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 37-45.
- [18] 王少博, 曹亚倩, 冯倩倩, 等. 保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 792-804.
- [19] 王永华, 刘焕, 辛明华, 等. 耕作方式与灌水次数对砂姜黑土冬小麦水分利用及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(5): 801-812.
- [20] 强小嫚, 张凯, 米兆荣, 等. 黄淮海平原地区深松和灌水次数对冬小麦一夏玉米节水增产的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(3): 491-502.
- [21] Zhang Y J, Wang R, Wang S L, et al. Effects of different subsoiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system [J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 151-158.
- [22] 白伟, 孙占祥, 张立祯, 等. 耕层土壤虚实结构优化春玉米根系形态提高水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2019, 5(21): 88-97.
- [23] Sun X F, Ding Z S, Wang X B, et al. Sub-soiling practices change root distribution and increase post-anthesis dry matter accumulation and yield in summer maize [J]. *Plos One*, 2017, 12(4): e0174952.
- [24] 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.
- [25] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 等. 耕作方式和灌水处理对冬小麦一夏玉米水分利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 102-109.
- [26] Nidia B S, Oscar S, Ingrid M, et al. Tillage effects on the soil water balance and the use of water by oats and wheat in a Mediterranean climate [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 68-77.
- [27] 尹宝重, 张永升, 甄文超. 海河低平原渠灌区麦田深松的节水增产效应研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(7): 1311-1320.
- [28] 王亮, 郭仁松, 吾买尔江·库尔班, 等. 深松深度对南疆滴灌棉田水分利用效率与产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 144-152.
- [29] 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.
- [30] 宋霄君, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1588-1597.
- [31] 阎晓光, 李洪, 王青水, 等. 不同深松时期对旱地春玉米水分利用状况及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(6): 165-170.
- [32] 刘战东, 张凯, 黄超, 等. 不同耕作和灌溉方式对玉米光合特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 213-220.
- [33] 程思贤, 刘卫玲, 靳英杰, 等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1355-1365.
- [34] 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [35] Kaur R, Arora V K. Deep tillage and residue mulch effects on productivity and water and nitrogen economy of spring maize in north-west India [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 724-731.
- [36] Kuang N K, Tan C D, Li H J, et al. Effects of subsoiling before winter wheat on water consumption characteristics and yield of summer maize on the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 227: 105786.
- [37] Raper R L, Reeves D W, Shaw J N, et al. Benefits of site-specific subsoiling for cotton production in Coastal Plain soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 174-181.
- [38] 张总正, 秦淑俊, 李娜, 等. 深松和施氮对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 790-798.
- [39] 罗俊, 林兆里, 阙友雄, 等. 耕作深度对蔗地土壤物理性状及甘蔗产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 405-412.
- [40] Wang X, Zhou B, Sun X, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots soil moisture and nitrogen status [J]. *Plos One*, 2015, 10(6): e0129231.
- [41] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [42] 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.
- [43] Mrabet R. Effects of residue management and cropping systems on wheat yield stability in a semiarid Mediterranean clay soil [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2011, 2(2): 202-216.
- [44] Wang S B, Guo L L, Zhou P C, et al. Effect of subsoiling depth on soil physical properties and summer maize (*Zea mays* L.) yield [J]. *Plant Soil Environ*, 2019, 65(3): 131-137.
- [45] Piao L, Qi H, Li C F, et al. Optimized tillage practices and row spacing to improve grain yield and matter transport efficiency in intensive spring [J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 258-268.