

DOI: 10.11766/trxb201902280624

不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响*

王玥凯^{1,2} 郭自春^{1,2} 张中彬¹ 周虎¹ 洪亮³ 王永玖³
李录久⁴ 彭新华^{1†}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 安徽省龙亢农场, 安徽怀远 233426)

(4 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031)

摘要 砂姜黑土结构不良是影响其生产力的主要限制因子。为改良其土壤结构, 基于安徽龙亢农场砂姜黑土耕作定位试验基地, 设置免耕、旋耕、深松和深翻四种处理, 研究不同耕作方式对砂姜黑土 0~40 cm 土层土壤物理结构、玉米根系发育及其产量的影响。结果表明: 1) 在玉米生育期内, 免耕处理下 0~40 cm 土壤平均容重和紧实度分别为 1.52~1.57 g·cm⁻³ 和 926~1 748 kPa, 高于其他耕作处理; 0~10 cm 土层有效水分库容和饱和导水率低于其他耕作处理, 分别仅为 0.12 cm³·cm⁻³ 和 3.5 × 10⁻⁵ mm·min⁻¹; 根系发育受到明显抑制, 根长密度和根干物质的量密度较其他耕作方式分别降低 42.5%~117%、35%~73.9%; 2016—2017 周年作物产量较深松和深翻降低 8%~12%。2) 与旋耕和深松相比, 深翻处理下 10~20 cm 土壤容重和 10~30 cm 土壤穿透阻力分别降低至 1.39~1.51 g·cm⁻³ 和 725~1 575 kPa, 0~10 cm 土壤饱和导水率显著提高至 4.15 × 10⁻² mm·min⁻¹, 0~20 cm 土壤有效水分库容提高至 17.9%~18.4%, 促进了 0~10 cm 土层根系发育, 具有较好的增产效果。3) 相关分析表明根长密度与土壤容重 ($r = -0.74^{**}$, $P < 0.01$) 和穿透阻力 ($r = -0.73^{**}$, $P < 0.01$) 呈极显著负相关关系。综上所述, 深翻改良砂姜黑土结构效果明显, 有利于作物生长, 为该区较适宜的耕作模式。

关键词 砂姜黑土; 深翻; 土壤结构; 根系特征; 作物产量

中图分类号 S158.5 **文献标识码** A

砂姜黑土主要分布在我国黄淮海平原, 总面积约 400 万 hm², 是典型的中低产土壤类型之一。该区域地势平坦、光热水资源丰富, 是我国重要的粮食主产区^[1-2]。砂姜黑土黏土矿物主要以 2:1 型膨胀性蒙脱石为主, 遇水膨胀而粘闭, 失水龟裂而僵硬, 致使难耕难耙^[2-3]。此外, 砂姜黑土有效水容量小、供水能力差^[3], 再加之土壤养分含量较低, 不利于作物的正常生长, 导致土壤生产力较低^[2]。近

年来, 该区域作物种植多采用浅旋耕技术, 导致耕层薄、结构紧实, 致使作物根系分布变浅, 严重制约了作物的水肥资源利用效率^[4]。因此, 针对砂姜黑土结构障碍, 如何采取有效的耕作措施改善耕层结构, 扩大水分库容、促进根系发育进而增加作物产量, 对该地区粮食生产安全和稳定具有重要意义。

旋耕作为当前农业生产中一种常规耕作方式, 能够使土壤疏松, 地表平整。但连年旋耕会造成土

* 国家重点研发计划项目课题 (2016YFD0300809)、国家自然科学基金项目 (41725004, 41771264) 和农业部行业专项课题 (201503116) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300809), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41725004 and 41771264) and the Ministry of Agriculture Industry Special Project (No. 201503116)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

作者简介: 王玥凯 (1994—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤结构与耕作研究。E-mail: ykwang@issas.ac.cn

收稿日期: 2019-02-28; 收到修改稿日期: 2019-05-14; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-18

壤中毛细孔隙减少,导致土壤通气、透水、增温性差;下雨后形成土壤结皮,造成土壤板结^[5]。免耕在减少土壤扰动和外源输入有机物的条件下,能够提高土壤孔隙连通性、提升土壤有机质含量和土壤团聚能力^[6-9],进而提高土壤蓄水能力。在干旱地区结合秸秆覆盖等农艺措施能够使作物增产 7.3%左右,但对非干旱区,免耕总体上造成作物减产;而黏性土壤长期免耕更是会造成土壤僵硬和排水不畅等不良后果^[10]。深松是在不翻转原本土层的基础上,打破犁底层,降低土壤容重及紧实度,扩大土壤水库容^[11-14]。然而,深松虽然有较好的扩蓄增容和增产效果,但干旱时土壤持水能力相对较弱,且耕层松紧不一,土块较大,反而给作物生长发育带来不利影响^[15]。深翻是在农机具辅助下将表层土壤翻到下层,并将亚表层土壤翻到上层,一般耕作深度达到 25 cm 以上^[16],能够有效降低土壤容重,提高大孔隙含量。Schneider 等^[17]发现不同区域间深翻总体上能够使作物增产,若土壤具有明显的紧实层,增产幅度可达 20%以上;但是对于土壤养分较贫瘠区域,由于深翻将养分较低的心土层翻至表层,加剧表层土壤贫瘠,甚至会导致减产。因此,不同耕作方式在不同区域间适用性尚存在较大差异。

目前,砂姜黑土区有关不同耕作方式下土壤物理性质和作物产量的研究尚较少,且并未对土壤结构变化及作物生长间关系进行系统研究^[4,18-21]。王小波等^[18]研究发现,相较于少耕,免耕处理下有机质和全氮含量明显提升。而程思贤等^[4]和赵亚丽等^[19]认为深松能够促进根系发育,有效提高水分利用效率,增加作物产量。Zhai 等^[20]和谢迎新等^[21]研究认为深耕能够降低土壤容重,增加土壤养分和有机碳含量,提升小麦产量。上述研究结果不尽相同,因此,本研究基于安徽龙亢农场耕作田间试验,比较不同耕作方式对土壤物理性质、玉米根系发育特征及其产量的影响,以期提出适宜砂姜黑土区的耕作方式,为丰产增效提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本研究基于安徽龙亢农场 2015 年 10 月建立的耕作培肥试验基地(33°32' N, 115°59' E),该区域

属暖温带半湿润季风气候,年平均温度 14.8℃,年平均降水量 900 mm。土壤类型为河湖相石灰性沉积物发育的砂姜黑土。自试验地建立起实行典型冬小麦/夏玉米一年两熟轮作制度。试验地建立前,耕层土壤容重为 1.35 g·cm⁻³,有机碳 19.8 g·kg⁻¹,全氮 0.87 g·kg⁻¹,碱解氮 156 mg·kg⁻¹,全磷 0.45 g·kg⁻¹,有效磷 18.9 mg·kg⁻¹,全钾 12.8 g·kg⁻¹,速效钾 162 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,共设置免耕、旋耕、深松和深翻四种耕作处理(表 1)。每个处理重复 3 次,共 12 个小区,每个小区面积为 160 m²(20 m×8 m)。作物体系为冬小麦(10 月至次年 6 月)/夏玉米(6 月至 10 月)轮作。本试验中氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(含 N 464 g·kg⁻¹、过磷酸钙(含 P₂O₅ 120 g·kg⁻¹)和氯化钾(含 K₂O 600 g·kg⁻¹)。每季 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 100 kg·hm⁻²、60 kg·hm⁻² 和 90 kg·hm⁻² 作为基肥,小麦、玉米拔节期追施 N 80 kg·hm⁻²。各处理田间管理一致。玉米出苗后定植株行距为 25 cm×60 cm。

1.3 样品采集与分析

玉米生长期,分别于苗期(2017-07-05)、灌浆期(2017-09-09)以及收获期(2017-10-25)采集土壤原状环刀样品(100 cm³),采样深度分别为 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm。105℃下烘干测定土壤容重,每个处理重复 6 次。

玉米收获时采集的土壤原状环刀样品(100 cm³)带回实验室饱和,用降水头法测定土壤饱和导水率;然后将环刀样品于 33 kPa 吸力下脱水平衡后测定田间持水量,于 1 500 kPa 吸力下脱水平衡测定萎蔫系数,田间持水量和萎蔫系数差值作为土壤有效水分库容^[22]。每个处理重复 6 次。

土壤穿透阻力测定:在玉米生长过程中,与环刀样品采集的相同时间测定土壤穿透阻力,每小区随机选取 10 个点采用紧实度仪(SC-900, RIMIK, 澳大利亚)田间原位测定 0~45 cm 土壤穿透阻力。

土壤含水量测定:每种耕作处理下选取其中一个小区,在土壤深度为 5 cm、15 cm 和 30 cm 埋设自动水分监测传感器(5TE, METER, 美国),分别代表 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤含水量。土壤水分监测频率设置为每两小时一次。

表 1 耕作处理田间试验设计

Table 1 Designing of the field experiment on tillage management

处理 Treatments	耕作方式 Tillage practices
免耕 No tillage	全年不耕作。采用中国农业大学研制的免耕播种机一次性完成播种及镇压作业 No tillage for a whole year. A no-till seeder, developed by the China Agricultural University, was used to implement the sowing and repressing operations at one time for each crop season
旋耕 Rotary tillage	每年玉米收获后(10月)旋耕机旋耕2遍,作业深度15cm。小麦收获后(6月)直接播种镇压 After maize was harvested in October each year, a rotary tiller was used to till the soil twice to the depth of 15 cm for wheat sowing. After wheat was harvested in June each year, maize was sowed directly without tillage
深松 Subsoiling	每年玉米收获后(10月)采用中国农业大学研制的深松机进行作业,作业深度35cm,然后浅旋10cm以打破大土块。小麦收获后(6月)直接播种镇压 After maize was harvested in October each year, a subsoiler, developed by the China Agricultural University, was used to subsoil to the depth of 35 cm. Then shallow rotary tillage (10 cm) was performed to break large clods for wheat sowing. After wheat was harvested in June each year, maize was sowed directly without tillage
深翻 Deep ploughing	每年玉米收获后(10月)进行深翻作业深度25~30cm,然后浅旋10cm以打破大土块。小麦收获后(6月)直接播种镇压 After maize was harvested in October each year, a moldboard plough was used to till the soil to the depth of 25~30 cm. Then shallow rotary tillage (10 cm) was performed to break large clods for wheat sowing. After wheat was harvested in June each year, maize was sowed directly without tillage

根系特征测定:玉米乳熟期每小区选取1株长势均匀的植株采集植株根系,以根茎为中心,将30cm×30cm样方每隔10cm一层取出土样,取样深度至40cm。将土样用自来水冲洗,挑出根系并冲洗干净,用WinRHIZO根系分析系统(Regent Instruments Inc,加拿大)进行根系扫描,获得总根长等指标。然后将根系在105℃杀青30min,80℃烘干至恒重后称重,根据采样体积计算根长密度与根干物质量密度。

作物产量测定:在2016年、2017年玉米成熟期,每个小区选取3块2m×2m样方进行测产。2017年小麦成熟期,每个小区选取3块1m×1m样方进行测产。

1.4 数据处理与分析

实验数据采用SPSS17.0进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),并用最小显著差异(LSD)法进行多重比较,相关分析采用皮尔森(Pearson)双变量相关分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 不同耕作方式对土壤容重的影响

在玉米不同生育阶段,不同耕作方式对不同

深度土壤容重的影响存在差异(表2):玉米苗期深松显著降低0~10cm土层容重($1.44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),其他处理对土壤容重的影响均无显著差异。灌浆期免耕处理0~10cm土层土壤容重($1.57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)显著高于其他耕作处理($P < 0.05$);旋耕10~20cm土层容重($1.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)较免耕和深松有所降低($1.58 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.59 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$);深翻显著降低10~20cm和20~40cm土层土壤容重($1.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。玉米收获时在0~10cm土层,免耕处理下土壤容重($1.48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)显著高于其他三种耕作处理($1.35\sim 1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)($P < 0.05$);在10~20cm土层,深翻处理下土壤容重($1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)显著低于其他处理($P < 0.05$);而在20~40cm处,不同耕作处理之间的土壤容重无差异($P > 0.05$)。

2.2 不同耕作方式对土壤穿透阻力的影响

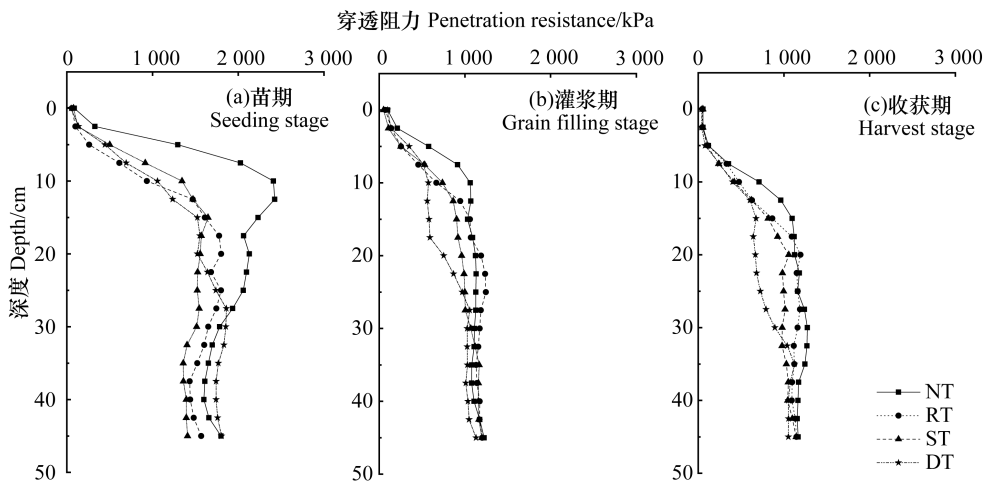
不同采样时期土壤穿透阻力在0~10cm深度范围随土壤深度增加而迅速上升(图1)。玉米苗期降水少,土壤含水量低,土壤穿透阻力较高。免耕处理下10~30cm深度范围土壤穿透阻力均显著高于其他三种耕作处理($P < 0.05$),在12.5cm处土壤穿透阻力高达2475kPa。其余耕作处理间无显著差异(图1(a))。

表 2 不同生育期耕作方式对土壤容重的影响

Table 2 Effect of tillage practices on soil bulk density relative to growing period / (g·cm⁻³)

生育期	深度	免耕	旋耕	深松	深翻
Growing period	Depth/cm	No tillage	Rotary tillage	Subsoiling	Deep ploughing
苗期 Seedling stage	0~10	1.50 ± 0.05ab	1.54 ± 0.02a	1.44 ± 0.04b	1.52 ± 0.05a
	10~20	1.55 ± 0.04a	1.56 ± 0.01a	1.55 ± 0.04a	1.51 ± 0.03a
	20~40	1.55 ± 0.01a	1.60 ± 0.03a	1.54 ± 0.03a	1.60 ± 0.03a
灌浆期 Grain filling stage	0~10	1.57 ± 0.02a	1.47 ± 0.02b	1.43 ± 0.03b	1.43 ± 0.02b
	10~20	1.58 ± 0.02a	1.52 ± 0.03b	1.59 ± 0.02a	1.47 ± 0.01c
	20~40	1.62 ± 0.02a	1.60 ± 0.02a	1.60 ± 0.02a	1.46 ± 0.03b
收获期 Harvest stage	0~10	1.48 ± 0.04a	1.39 ± 0.04b	1.39 ± 0.03b	1.35 ± 0.03b
	10~20	1.54 ± 0.03a	1.52 ± 0.03a	1.50 ± 0.03a	1.39 ± 0.02b
	20~40	1.57 ± 0.03a	1.58 ± 0.03a	1.56 ± 0.02a	1.52 ± 0.02a

注：不同小写字母表示同一土壤深度不同耕作处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同 Note: Different lowercase letters indicate significant difference between tillage treatments to the same soil depth ($P < 0.05$). The same below



注：NT 表示免耕，RT 表示旋耕，ST 表示深松，DT 表示深翻，下同 Note: NT stands for no tillage, RT for rotary tillage, ST for subsoiling, and DT for deep ploughing. The same below

图 1 不同采样时期不同耕作方式下 0~45 cm 土壤穿透阻力变化

Fig. 1 Effect of tillage practices on soil penetration resistance of the 0~45 cm soil layer relative to sampling date

2017 年 8 月之后降水量增加，土壤穿透阻力较苗期明显降低。玉米灌浆期免耕处理下 5~15 cm 深度范围穿透阻力显著高于其他处理；深翻显著降低 10~30 cm 深度范围土壤平均穿透阻力至 725 kPa，其他三种耕作处理平均穿透阻力在 938~1 092 kPa 之间（图 1 (b)）。

玉米收获期，除深翻处理外，其余三种处理 10~40 cm 土层穿透阻力保持在 1 200 kPa 左右的范围。在 0~10 cm 深度范围，免耕处理下土壤穿透阻力高于其他耕作处理，其余三种耕作处理土壤穿透

阻力基本一致。在 10~30 cm 土层，土壤平均穿透阻力由低至高依次为：深翻(764 kPa)、深松(930 kPa)、旋耕(1 061 kPa)、免耕(1 158 kPa)。在 30~40 cm 处，各耕作处理之间土壤穿透阻力无明显差异（图 1 (c)）。

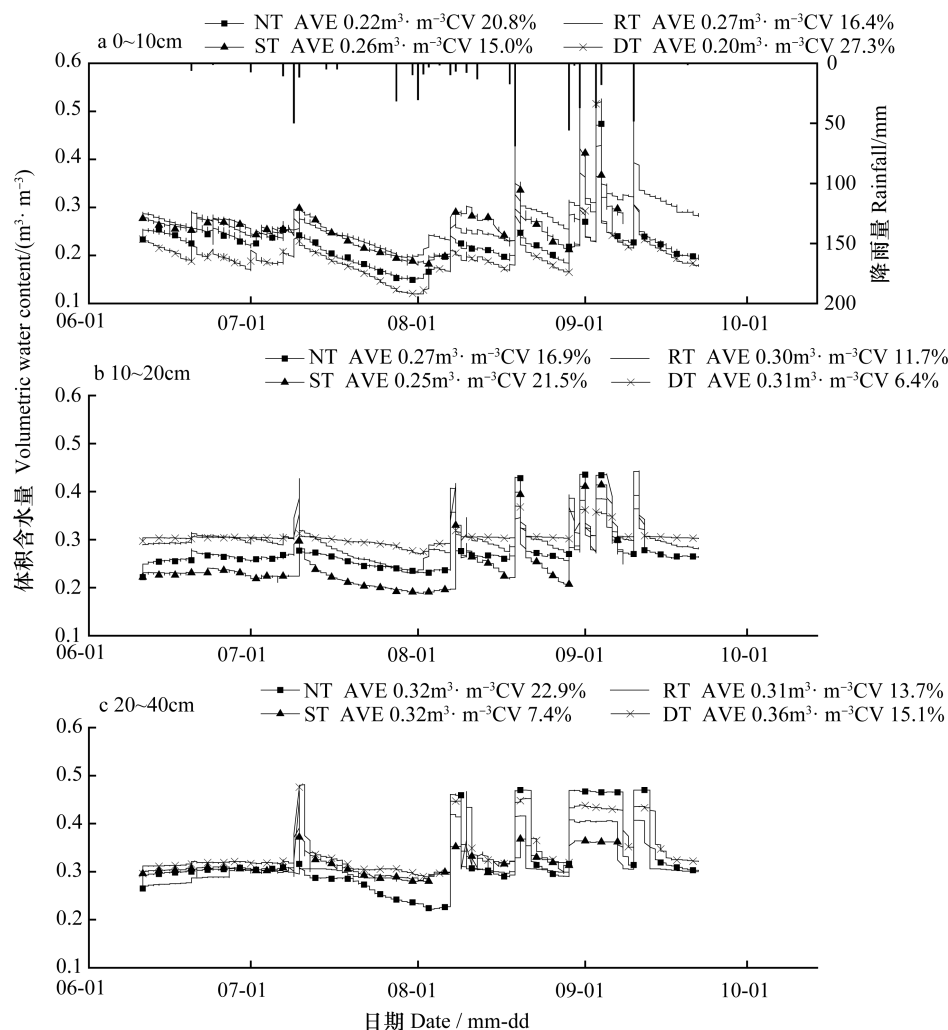
2.3 不同耕作方式对土壤水分和饱和导水率的影响

不同土层土壤含水量对降水响应存在差异。0~10 cm 土层土壤含水量较深层低且变异系数较大（图 2）。有趣的是，在降水过后 10~20 cm 和 20~40 cm

的土壤含水量在一定时间保持一个“高台”现象，这一现象随土壤深度加深而更加明显，说明该研究区域土壤排水困难。玉米生育期内各耕作处理不同土层土壤平均体积含水量也表现各异。在 0~10 cm 处，深翻处理下平均体积土壤含水量 ($0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) 低于其他耕作处理 ($0.22 \sim 0.27 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)；而在 20~40 cm 处，深翻处理下平均体积土壤含水量 ($0.36 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) 高于其他耕作处理 ($0.31 \sim 0.32 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)。在降水较少的 7 月至 8 月上旬期间，0~10 cm 土层免耕和深翻处理下含水量低于其他耕作处理。8 月中旬以后，雨量增大，0~10 cm 土层旋耕处理土壤含水量明显高于其他耕作处理。

土壤有效水分库容随深度增加而降低 (图 3 (a))，这与土壤容重增加或土壤持水孔隙减少有关 (表 2)。0~10 cm 和 10~20 cm 土层深松和深翻处理下土壤有效水分库容较免耕和旋耕处理显著提升 5%~7% ($P < 0.05$)。旋耕处理 20~40 cm 土层土壤有效水分库容明显降低，这可能与土层容重增加有关。

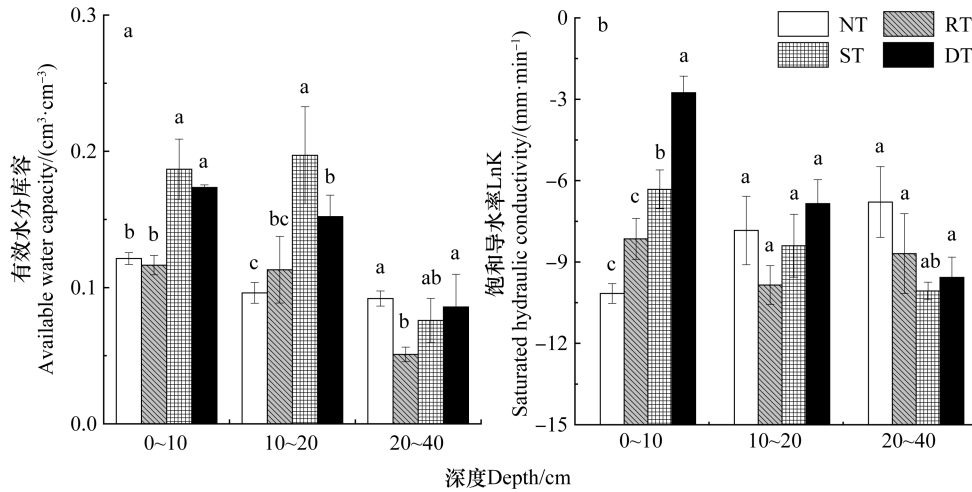
土壤饱和导水率随深度呈递减趋势 (图 3 (b))。0~10 cm 土层深松和深翻处理下土壤饱和导水率较高，分别为 $4.15 \times 10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $1.09 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，显著高于免耕 ($3.87 \times 10^{-5} \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 和旋耕处理 ($1.48 \times 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。而 10 cm 深度以下各耕作处理的饱和导水率均较低且无显著差异。



注：AVE 表示生育期内土壤体积含水量平均值，CV 表示变异系数 Note: AVE stands for average volumetric soil water content in growing period, and CV stands for coefficient of variation

图 2 不同耕作方式对土壤体积含水量的影响

Fig. 2 Effect of tillage practices on soil volumetric water content



注：不同小写字母表示同一深度不同耕作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Note: Different letters indicate significant difference between tillage treatments in the same soil depth ($P < 0.05$). The same below

图 3 不同耕作方式对有效水分库容 (a) 和饱和导水率 (b) 的影响

Fig. 3 Effects of tillage practices on soil available water capacity (a) and saturated hydraulic conductivity (b)

2.4 不同耕作方式对玉米根系和作物产量的影响

不同耕作处理下 90%以上玉米根系集中在 0~10 cm 深度范围内 (图 4)。在 0~10 cm 土层, 深翻处理下根长密度显著高于免耕和深松处理 ($P < 0.05$), 较免耕、旋耕、深松分别增加了 117%、34.5%、74.5%; 根干物质质量密度分别增加了 73.9%、35.4%、38.9%。10~20 cm 和 20~40 cm 深度旋耕处理根长密度和根干物质质量密度显著高于免耕和深松处理 ($P < 0.05$)。

不同耕作方式对 2016—2017 年周年作物产量影响未达到显著水平 ($P > 0.05$), 但产量提升幅度明显 (图 5)。2016 年玉米季深松和深翻较免耕分别增产 8.22%和 9.69%, 较旋耕分别增产 10.32%和 11.81%。2017 年小麦季深翻较免耕和旋耕分别增产

12.27%和 7.21%。2017 年玉米季深松和深翻处理下玉米产量较免耕增产分别为 12.2% 和 11.0%, 与旋耕产量相当。

2.5 土壤物理结构与根系发育及作物产量间相关性

将玉米生育期内各采样时期以及全生育期各小区 0~40 cm 深度范围内土壤结构性性质与根系密度取平均值后进行相关分析发现: 根长密度随土壤容重和穿透阻力增加而显著降低。除玉米苗期土壤穿透阻力和容重与根系发育相关性未达到显著水平外 ($P > 0.05$), 其余采样时期土壤穿透阻力和容重均与根长密度呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。全生育期土壤平均穿透阻力和平均容重与根长密度间均呈极显著负相关关系 ($r = -0.74, r = -0.73, P < 0.01$)。

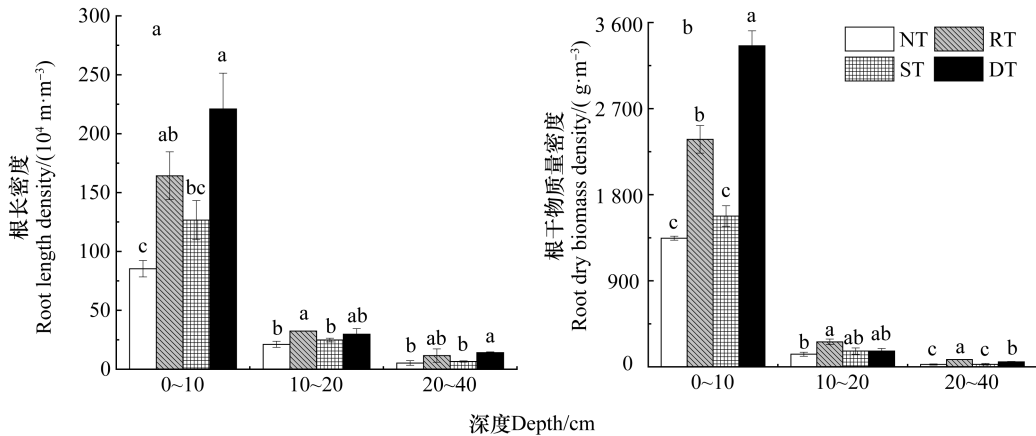


图 4 不同耕作方式对根长密度 (a) 和根干物质质量密度 (b) 的影响

Fig. 4 Effects of tillage practices on root length density (a) and root dry biomass density (b)

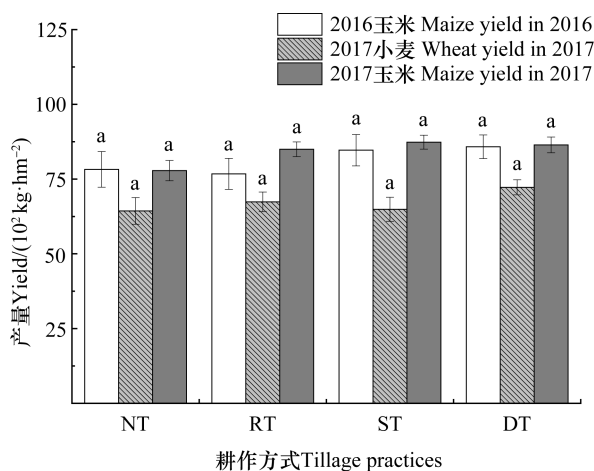
表 3 2017 年玉米生育期内土壤物理性质与根系发育及玉米产量间相关性

Table 3 Relationships between root biomass and crop yield with soil properties during the crop growing season in 2017

生育期	指标	根长密度	根干物质量密度	产量
Growing period	Index	Root length density/ ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	Root dry biomass density/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Yield/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
苗期	紧实度 ^① / kPa	-0.57	-0.29	-0.42
Seedling stage	容重 ^② / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.05	-0.04	-0.07
灌浆期	紧实度 ^① / kPa	-0.69*	-0.71**	-0.51
Grain filling stage	容重 ^② / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	-0.79**	-0.51	-0.23
收获期	紧实度 ^① / kPa	-0.73**	-0.61*	-0.55
Harvest stage	容重 ^② / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	-0.65*	-0.53	-0.04
全生育期	紧实度 ^① / kPa	-0.74**	-0.54	-0.55
Entire growing period	容重 ^② / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	-0.73**	-0.53	-0.24

注：*，**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上（双侧）显著相关
respectively. ①Soil penetration resistance, ②Bulk density

Note: *,** indicate a significant level at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$,



注：不同小写字母表示相同年份和作物不同耕作处理间差异显著 ($P < 0.05$) Note: Different lowercase letters indicate significant difference between tillage treatments in the same year ($P < 0.05$)

图 5 不同耕作方式对作物产量的影响

Fig. 5 Effects of tillage practices on crop yield

3 讨论

3.1 不同耕作方式下土壤紧实度差异

本研究通过对不同耕作处理下土壤物理结构、根系发育及玉米产量的综合分析发现：除玉米苗期外，免耕处理下土壤容重均显著高于其他三种处理，而穿透阻力始终处于较高水平。免耕对土壤扰动较小，长期免耕或少耕条件下土壤紧实程度增加^[10,20]。土壤水分是影响土壤结构变化的重要驱动力^[23]。玉米苗期降水稀少，土体干旱而强烈收缩，不同耕作

处理下土壤孔隙体积明显下降。大量研究表明，土壤容重增加时土壤收缩能力减弱^[23-25]，砂姜黑土富含膨胀性黏土矿物且黏粒含量较高，其强收缩性可能掩蔽了耕作创造的多孔结构，使得玉米苗期不同耕作处理间土壤容重无较大差异，且高于灌浆期和收获期时土壤容重（表 2）。旋耕对 0~10 cm 土层土壤容重和土壤穿透阻力具有降低作用，但明显提高了土壤 10 cm 以下土壤紧实程度（表 2 和图 1）。旋耕耕作深度较浅，亚表层土壤长期受上层土壤及农机具重力作用，孔隙空间不断减小，土粒排列紧密，土壤容重和穿透阻力明显提升^[5]。多数研究表明，深松和深翻能够打破犁底层，显著降低土壤容重和土壤穿透阻力^[6,14,19]。本研究中除玉米苗期外，深翻处理显著降低了 0~20 cm 土层土壤容重，整个生育期内 10~30 cm 深度范围土壤穿透阻力显著下降（表 2 和图 1）。这是因为适度深翻将亚表层紧实土壤与表层土壤充分混合，对降低土壤紧实程度具有明显效应^[17]。而深松在仅打破犁底层而不翻转土层的条件下，不能完全改变土壤压实状态^[6]，土壤物理结构改善效果不如深翻。随玉米生长，不同耕作处理 0~10 cm 土层土壤容重逐渐降低，免耕 10~40 cm 和旋耕 20~40 cm 土层容重无明显变化（表 2）。除水分影响外，作物根系发育也存在一定影响。耕作创造出疏松的土壤结构促进根系发育，而更为发达的根系对进一步降低土壤容重也起到一定作用。因此，对于膨胀性黏土矿物含量较高、胀缩性强的砂姜黑土^[3-4]，

适时深翻更有利于创造良好的土壤结构。

3.2 不同耕作方式下土壤水分差异

不同耕作方式间土壤结构存在较大差异,进而影响水分动态变化过程^[26-29]。土壤结构疏松,土壤孔隙度相应提升,这使得土壤有较大的储水空间而具有更高的有效水分库容^[27-28]。深翻处理下有效水分库容显著提升(图3(a)),这与土壤容重降低结果(表2)一致,说明该处理下土壤结构改善,土壤孔隙增加,进而蓄持更多的土壤水分。玉米生育期内,深翻处理表层土壤含水量低而深层土壤含水量高(图2),说明深翻降低了土壤容重(或增加了土壤孔隙度),增强土壤水下渗,这与其较高的土壤饱和导水率(图3(b))一致。上述结果表明深翻处理土壤蓄水和排水能力均得到提升。

3.3 不同耕作方式下玉米根系生长差异

土壤物理结构通过影响根系发育状况对作物产量产生较大影响,随植物的生长发育,耕作营造的土壤多孔结构对根系发育的影响逐渐明显^[29-31]。本研究发现,土壤紧实程度与作物根系间具有明显负相关关系,在砂姜黑土区夏玉米根系发育最为旺盛的8月中旬至9月末^[31],土壤紧实程度的增加极显著地抑制根系生长(表3)。紧实的土壤结构会降低根系的生长速率与伸长范围,使根聚集于土壤表层并且显著影响根系对水分的吸收^[29-30]。Passioura^[32]发现土壤容重和土壤穿透阻力高于 $1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 1 MPa 时根系生长明显放缓。玉米整个生育期内90%以上根系集中于0~10 cm耕层,该深度范围内土壤穿透阻力除免耕处理外均低于 1 MPa ,免耕处理根长密度和根干物质质量密度明显低于其他处理(图4)。深松和深翻处理下0~10 cm深度土壤平均穿透阻力均低于 450 kPa (图1)。尤其是深翻处理,该层平均穿透阻力仅为 361 kPa ,根长密度和根干物质质量密度显著高于其他耕作处理。

3.4 不同耕作方式下作物产量差异

2016年玉米、2017年小麦以及2017年玉米产量结果显示,深翻较免耕增产均接近或超过10%,但是与传统耕作方式旋耕产量相当,与2016年玉米增产超过10%相比低很多(图5)。这可能是由于砂姜黑土地区雨量分配不均,旱涝交替明显,从而严重影响了玉米生长,作物产量年际差异较大。本研究中,不同耕作方式下土壤萎蔫系数无明显差异,大致在19%~21%之间。在玉米生育较为重要的7月

中旬至8月上旬期间,降水稀少,土壤体积含水量甚至低于萎蔫系数(图2)。由于砂姜黑土毛管水上升性能较差,地下水无法及时补给或沿土壤裂隙蒸发^[33],使得玉米受到干旱的影响。此外,旱作耕地的通气孔隙以占土壤体积的15%为宜,小于10%则会出现渍害^[3]。对于不仅蓄水容量小而且供水强度差的砂姜黑土而言更是如此。生育期内不同耕作处理间土壤孔隙度范围在 $0.4\sim 0.5\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,当通气孔隙低于10%时(土壤含水量应为 $0.3\sim 0.4\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$),田间淹水出现渍害。8月中旬以后,雨量增大,深翻处理土壤水分下渗能力较强,在玉米整个生育期内10~20 cm和20~40 cm土层土壤含水量高于 $0.3\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 的时间占比明显高于其他耕作处理(图2)。旱涝渍害可能是掩蔽深翻增产幅度的重要原因(图5)。

4 结 论

通过耕作定位试验对土壤物理结构变化、根系发育及作物产量的综合分析,在2017年玉米生育期内深翻显著降低了亚表层土壤容重和穿透阻力,提高了土壤有效水分库容和饱和导水率,较免耕和旋耕处理明显改善土壤结构状况,且优于深松处理,促进了根系发育并提高了玉米产量。深翻是改良砂姜黑土较适宜的耕作模式。

致 谢 感谢中国农业大学杨丽老师提供的深松机和免耕播种机。感谢丁英志协助采集和分析样品。感谢邵林斌夫妇协助田间管理。

参 考 文 献

- [1] 吕巨智,程伟东,钟昌松,等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响. 中国农学通报, 2014, 30(30): 38-43
Lü J Z, Cheng W D, Zhong C S, et al. Effects of different cultivation methods on the soil physical properties and yield of maize (In Chinese). Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 38-43
- [2] 宗玉统. 砂姜黑土的物理障碍因子及其改良. 杭州: 浙江大学, 2013
Zong Y T. The physical obstacle factors of Shajiang black soils and its improvement (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang University, 2013
- [3] 张义丰,王义丰,刘录祥. 淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理. 地理科学进展, 2001, 20

- (2): 169-176
Zhang Y F, Wang Y F, Liu L X, Function mechanism between the drought and waterlogging disaster and the soil-structure of the Shajiang Soil in Huaibei Plain (In Chinese). *Progress in Geography*, 2001, 20 (2): 169 - 176
- [4] 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. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (9): 1355-1365
Cheng S X, Liu W L, Jin Y J, et al. Effect of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in lime concretion black soil (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2018, 26 (9): 1355—1365
- [5] Liu X, Zhang X, Chen S, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root–shoot relation and grain yield of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 2015, 154: 59—67
- [6] Çelik İ, Günal H, Acar M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 17—28
- [7] Zhang S, Chen X, Jia S, et al. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 2015, 154: 84—90
- [8] Pareja-Sánchez E, Plaza-Bonilla D, Ramos M C, et al. Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agroecosystem transformed into irrigation. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 221-230
- [9] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响. *中国农业科学*, 2007, 40 (9): 1973—1979
Zhou H, Lü Y Z, Yang Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (9): 1973—1979
- [10] Pittelkow C M, Liang X, Linqvist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 2015, 517 (7534): 365—368
- [11] Seibel H. Subsoil improvement by deep ploughing, represented by the example of the area of community of Heppenheim *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 1972: 341—353
- [12] Bogunovic I, Pereira P, Kistic I, et al. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols Croatia. *Catena*, 2018, 160: 376—384
- [13] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征. *农业工程学报*, 2015, 31 (9): 63-70
Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods incropland (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2015, 31 (9): 63—70
- [14] 郑洪兵, 刘武仁, 罗洋, 等. 耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响. *水土保持学报*, 2018, 32 (3): 264—270
Zheng H B, Liu W R, Luo Y, et al. Effect of different tillage methods on soil water content and water use efficiency in cropland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (3): 264—270
- [15] 许迪, Schmi R, Mermoud A. 夏玉米耕作方式对耕层土壤特性时间变异性的影响. *水土保持学报*, 2000, 14 (1): 64—70
Xu D, Schmi R, Mermoud A. Effects of tillage practices on temporal variations of soil surface properties (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14 (1): 64—70
- [16] Wang Y L, Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20 (5): 1139—1150
- [17] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know? *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 193—204
- [18] 王晓波, 车威, 纪荣婷, 等. 秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响. *土壤*, 2015, 47 (3): 483—489
Wang X B, Che W, Ji R T, et al. Effects of straw returning and conservation tillage patterns on the contents of organic matter and nitrogen nutrient in the lime concretion black soil (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (3): 483—489
- [19] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2018, 51 (13): 2489—2503
Zhao Y L, Liu W L, Cheng S X, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (13): 2489—2503
- [20] Zhai L, Xu P, Zhang Z, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on dry matter accumulation and grain yield of summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 167—174
- [21] 谢迎新, 靳海洋, 李梦达, 等. 周年耕作方式对砂姜黑土农田土壤养分及作物产量的影响. *作物学报*, 2016, 42 (10): 1560—1568
Xie Y X, Jin H Y, Li M D, et al. Effect of annual tillage practices on soil nutrient and crop yield in lime concretion black soil farmland (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42 (10): 1560—1568
- [22] 依艳丽. *土壤物理研究法*. 北京: 北京大学出版社, 2009
Yi Y L. *Research methods of soil physics* (In Chinese).

- Beijing: Peking University Press, 2009
- [23] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展. 土壤学报, 2015, 52 (3): 477—488
Zhang Z B, Peng X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 477—488
- [24] 熊东红, 周红艺, 杜长江, 等. 土壤裂缝研究进展. 土壤, 2006, 38 (3): 249—255
Xiong D H, Zhou H Y, Du C J, et al. A review on the study of soil cracking (In Chinese). Soils, 2006, 38 (3): 249—255
- [25] Zhang Z B, Peng X, Wang L L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation. Geoderma, 2013, 192: 12—20
- [26] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 深耕对黑土水分特征及动态变化影响. 土壤通报, 2018, 49 (4): 942—948
Wang Q J, Liu F, Jiao F, et al. Effect of deep tillage on water characteristics in blacksoil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (4): 942—948
- [27] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. 土壤学报, 2010, 47 (4): 611—620
Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (4): 611—620
- [28] Feng X, Hao Y, Latifmanesh H, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of Northeastern China. Agronomy Journal, 2018, 110 (4): 1607—1615
- [29] 李运生, 王菱, 刘士平, 等. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响. 生态学报, 2002, 22 (10): 1680—1687
Li Y S, Wang L, Liu S P, et al. The influence of different amounts of water supplied at different depths in soil-root interface on root distribution and yield of winter wheat (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (10): 1680—1687
- [30] Bengough A G, Mullins C E, Wilson G. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots. European Journal of Soil Science, 1997, 48 (4): 603—612
- [31] 杨青华, 高尔明, 马新明. 砂姜黑土玉米根系生长发育动态研究. 作物学报, 2000, 26 (5): 587—593
Yang Q H, Gao E M, Ma X M. Study on growing dynamic of maize root system in shajiang black soil (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2000, 26 (5): 587—593
- [32] Passioura J B. Soil conditions and plant growth. Plant, Cell & Environment, 2002, 25 (2): 311—318
- [33] 孙怀文. 砂姜黑土的水分特性及其与土壤易旱的关系. 土壤学报, 1993, 30 (4): 423—430
Sun H W. Moisture characters of calcic concretion black soil and their relationship with soil drought(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1993, 30 (4): 423—430

Effect of Tillage Practices on Soil Physical Properties and Maize Growth in Shajiang Black Soil (Vertisol)

WANG Yuekai^{1,2} GUO Zichun^{1,2} ZHANG Zhongbin¹ ZHOU Hu¹ HONG Liang³
WANG Yongjiu³ LI Lujia⁴ PENG Xinhua¹

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Longkang Farm of Anhui Province, Huaiyuan, Anhui 233426, China)

(4 Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract 【Objective】 Shajiang black soil is one of the major types of soil low or medium in productivity in China. As its parent material is dominated with montmorillonite and high in clay content, the soil is high in bulk density and strength and low in water permeability. These characteristics of the soil are the main factors limiting root development and yield of crops. Tillage practices, such as subsoiling and deep ploughing, have been considered as effective management practices to improve soil structure, but their adaptability varies quite significantly with region. How to adopt effective tillage practices to improve soil structure, expand available water capacity, promote root development and increase crop yield is of great significance to safety and stability of the grain production in this region. The objective of this study was to evaluate systematically effects of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil. 【Method】 A long-term field experiment in the

Longkang Farm, Anhui Province was initiated in 2015 and designed to have four treatments different in tillage practices, including no tillage, rotary tillage, subsoiling and deep ploughing. Each treatment had three replicates, making up a total of 12 plots, laid out in a single factor randomized block design. Soil bulk density in the 0~10 cm, 10~20 cm and 20~40 cm soil layers and penetration resistance of the 0~45 cm soil layer were measured separately at different growth stages of maize. Features of the root system of maize in the soil profile were measured only at the milk-ripe stage. Soil available water capacity, saturated hydraulic conductivity and some other soil physical properties in the three layers were determined separately and yield of the crop was calculated after the crop harvested. At the end, relationships between crop growth with physical properties were analyzed.

【Result】 1) Compared with the other three treatments, the no-tillage one was higher in bulk density ($1.52\sim 1.57\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and in soil penetration resistance ($926\sim 1\ 748\text{ kPa}$), but lower in soil available water capacity ($0.12\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) and in saturated hydraulic conductivity ($3.5\times 10^{-5}\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) in the 0~40 cm soil layer depth throughout the entire maize growing period. Consequently, the root length density and root dry biomass density in that treatment were significantly declined 42.5%~117.1% and 35%~73.9%, respectively, in the 0~10 cm soil layer than those in the other treatments. The no-tillage treatment was also 8%~12% lower than the others in crop yield for three successive years. 2) Relative to the treatments of rotary tillage and subsoiling, the treatment of deep ploughing was lower in bulk density ($1.39\sim 1.51\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) in the 10~20 cm soil layer and in soil penetration resistance ($725\sim 1\ 575\text{ kPa}$) in the 10~30 cm soil layer, but higher in saturated hydraulic conductivity in the 0~10 cm soil layer and in soil available water capacity in the 0~20 cm soil layer. Consequently, the plants in that treatment were higher in root density and crop yield than those in the other two treatments. 3) Pearson correlation analysis shows that plant root density was significantly and negatively related to soil bulk density ($r=-0.74^{**}$, $P < 0.01$) and soil strength ($r=-0.73^{**}$, $P < 0.01$) for the whole growing period.

【Conclusion】 It is, therefore, concluded that the deep ploughing may be a more appropriate tillage practice to improve soil physical properties and promote crop agronomic performance in the Shangjiang black soil.

Key words Shangjiang black soil; Deep ploughing; Soil structure; Root characteristic; Crop yield

(责任编辑: 陈荣府)