

基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化

刘俊安 王晓燕 李洪文 何进 王庆杰 李问盈

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对目前深松铲作业阻力大的问题,以3种深松铲(凿形、箭形、翼形)为研究对象,以深松铲的铲形、入土角 α 和张角 β 为试验因素,在辽宁省春玉米垄作区,进行了田间正交试验。检测了深松沟土壤扰动等指标和深松阻力 F ,计算了深松沟形面积与牵引阻力比值即沟形面积比阻。结果表明, α 、 β 对耕后土壤特性、深松沟形面积和沟形面积比阻没有显著影响。 α 对阻力 F 有显著影响, F 随 α 先减小,再增大,当 α 为 21° 时阻力最小。铲形对耕后土壤特性、深松沟形面积、阻力 F 和沟形面积比阻有显著影响,凿形铲、箭形铲和翼形铲作业对土壤扰动面积依次增大,翼形铲的扰动面积分别比凿形铲和箭形铲大49.8%、30.0%,箭形铲扰动面积比凿形铲大15.3% ($P < 0.05$);但翼形铲所受阻力分别比箭形铲和凿形铲大123.6%和36.6%,箭形铲比凿形铲所受阻力大63.7% ($P < 0.05$)。从凿形铲到翼形铲,沟形面积比阻依次增大,凿形铲的沟形面积比阻分别较箭形铲和翼形铲小42.4%和50.2% ($P < 0.05$),箭形铲的沟形面积比阻较翼形铲小5.4% ($P < 0.05$)。综合深松铲对土壤扰动疏松效果、牵引阻力及沟形面积比阻分析,入土角 α 为 21° 的凿形铲是相对最优的铲形。

关键词: 深松; 铲形; 入土角; 土壤扰动量; 牵引阻力

中图分类号: S222.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0060-08

Optimization of Structural Parameters of Subsoiler Based on Soil Disturbance and Traction Resistance

LIU Jun'an WANG Xiaoyan LI Hongwen HE Jin WANG Qingjie LI Wenyong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As one of the key technologies of conservation tillage, subsoiling has been widely promoted in northern China, while the large traction resistance and high energy consumption of subsoiling is the main problem of subsoiling. The structural parameters of subsoiler, which included spade shape, penetrating angle and wingspan angle, had significant effects on the soil property of subsoiling trench and the traction resistance of subsoiler. In order to investigate the effect on the soil physical properties (bulk density, soil porosity and cone index) of subsoiling trench in 0 ~ 40 cm depth, calculate the subsoiling trench cross-sectional area (TCA) and the traction resistance of subsoilers, and make optimization for the key structural parameters of subsoiler, the chisel-shape subsoiler (CS), arrowhead-shape subsoiler (AS) and wing-shape subsoiler (WS) were designed and tested under no-tillage conditions. Orthogonal experiment was conducted in spring maize ridge-tillage area which was located in Zhangwu county, Liaoning province in Northeast China. The trench specific resistance (TSR) of the above three subsoilers had also been calculated. The results indicated that penetrating angle α and wingspan angle β had no significant effect on the change of soil physical properties, TCA and TSR, while the change of α had a significant influence on the traction resistance, and it would be the minimum subsoiler when α was 21° . The spade shape of subsoilers affected soil physical properties, TCA, traction resistance and TSR significantly. The soil disturbance extent of subsoiling and TCA were increased in accordance with the order of CS, AS and WS. TCA for WS was greater than those for CS and AS by 49.8% and 30.0%, respectively, and TCA for AS was greater than that for CS by 15.3% ($P < 0.05$). However, the traction resistance for WS was greater than those for CS and AS by 123.6% and 36.6%, respectively, and the traction resistance for

收稿日期: 2016-06-16 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205398)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 刘俊安(1989—),男,博士生,主要从事保护性耕作研究,E-mail: jun_an2008@cau.edu.cn

通信作者: 王晓燕(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事可持续机械化生产系统与装备研究,E-mail: xywang@cau.edu.cn

AS was greater than that for CS by 63.7% ($P < 0.05$). TSR was significantly affected by the spade shape, and it was increased with the order of CS, AS and WS. TSR for CS was less than those for AS and WS by 42.4% and 50.2%, respectively, and TSR for AS was less than that for WS by 5.4%. The analysis result showed that if it was just to get relatively more soil disturbance, WS would be the best choice when its penetrating angle α was 21° . While taking subsoiling trench's soil properties, TCA and traction resistance, especially TSR into consideration, the relatively best subsoiler was chisel-shape subsoiler (CS) when its penetrating angle α was 21° .

Key words: subsoiling; shovel shape; penetrating angle; soil disturbance; traction resistance

引言

深松是保护性耕作技术的基本耕作方式之一,对土壤进行适当深松,可有效改善土壤状况^[1],促进作物及其根系的生长进而提高作物产量^[2-5]。目前,深松技术已经得到大力推广。深松铲铲尖是深松机具最重要的工作部件,其形状和结构参数对土壤的破碎扰动效果及阻力能耗均有重要影响^[6-7]。

根据铲尖形状的不同,深松铲可分为凿形铲、箭形铲和翼形铲,其中凿形铲由于在打破犁底层、改善土壤持水性能以及节能减阻等方面综合效应相对较好而得到相对更广泛的应用^[8]。余泳昌等^[9]从力学分析的角度建立了深松铲受力的数学模型,并进行了验证试验,明确了影响深松阻力的参数有深松铲入土角、作业速度和深度。周桂霞等^[10]以翼形铲的翼张角、刃角和翼倾角为试验因子,进行了二次正交旋转试验,建立了铲形铲结构参数与牵引阻力的数学模型。张金波等^[11]以小鼠爪为模型,对深松铲进行了仿生减阻。还有学者借助 Pro/E 或 ANSYS/LS-DYNA、EDEM 工程软件对深松铲结构参数进行仿真分析优化^[12-14]。综合分析,国内学者对深松铲优化的评价指标主要是阻力功耗,而从土壤扰动疏松效果的角度进行优化评价的较少,结合土壤扰动和牵引阻力两方面进行深松铲结构参数的优化研究更少。

以相对较小的能耗需求获得相对合适的土壤扰动是深松作业要达到的理想效果^[15]。RAPER^[16-17]通过深松试验,研究了偏柱式深松铲和直柱式深松铲对土壤的深松效果以及不同类型深松铲的作业牵引阻力和产生的能耗。为减少深松铲作业能耗,同时提高深松作业质量,本文以常见的凿形铲、箭形铲和翼形铲为研究对象,通过田间正交试验,研究了深松铲铲形及其关键结构参数对土壤容重、紧实度、土壤扰动量等参数和作业阻力的影响。综合分析土壤扰动效果和作业阻力两方面指标参数,并引入深松沟截面积比阻系数(牵引阻力与深松沟截面积比值),对深松铲铲形及结构参数进行优化分析,以获得一种铲形及其结构参数相对最优的深松铲。

1 材料与方 法

1.1 试验条件与仪器设备

试验点在辽宁省彰武县五峰镇宣女村,位于辽宁省西北部($122^\circ 25' E, 42^\circ 15' N$),土质类型为棕壤土。试验区属于春玉米垄作区,秸秆粉碎一次后还田。仪器设备主要有:后悬挂农具田间试验平台及雷沃欧豹 TD904 型轮式拖拉机,该试验平台可检测农机具田间作业时受阻力、油耗、扭矩以及作业速度等指标^[18]。试验仪器还包括 SC-900 型土壤紧实度仪、环刀、环刀托、卷尺、透明塑料板、坐标纸、精度 0.01 g 的电子秤、鼓风机干燥箱、记号笔等。

1.2 试验设计

1.2.1 影响因素的确定

根据国内外学者的研究结果^[9-10],深松铲铲形、入土角 α 、翼铲张角 β 、深松作业深度 H 和深松作业速度 v 是影响深松铲牵引阻力的主要影响因素。根据当地农艺要求和设备条件,深松作业深度为 40 cm,拖拉机行驶速度 v 为 3.0 km/h。下面主要分析深松铲尖的结构参数(图 1)。

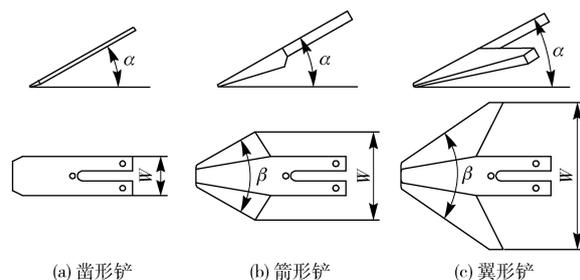


图 1 深松铲尖结构简图

Fig. 1 Structural diagrams of three type subsoilers

(1) 深松铲铲形:即深松铲铲尖结构形状。深松铲铲尖的形状对牵引阻力的大小和土壤扰动有一定的影响,铲形越宽,对土壤的扰动越大,同时受到的牵引阻力也就越大。根据已有的研究,本文确定以铲形宽度依次增大的凿形铲、箭形铲和翼形铲为铲形因素的 3 个水平。参照《农业机械设计手册》^[19],将 3 类铲尖宽度 W 分别设计为 80、180、300 mm。试验中为便于表示,分别将凿形铲、箭形铲和翼形铲简称为 CS 铲、AS 铲和 WS 铲。

(2)入土角 α :即深松铲铲尖上表面与水平面的夹角。入土角过小,深松铲不易入土,降低深松质量;入土角过大,会增加牵引阻力和作业能耗。参考农机设计手册和相关文献,确定入土角范围为 $18^\circ \sim 24^\circ$ 。

(3)翼铲张角 β :翼张角过小,深松铲对犁底层扰动效果降低;翼张角过大,牵引阻力可能会增大。试验中,确定翼张角范围为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。

1.2.2 试验方案

通过上述分析,确定深松铲铲形、入土角 α 和张角 β 为试验因素。试验因素水平设置如表1所示,并将3类铲形的宽度设计三因素三水平的正交试验,选用 $L_9(3^3)$ 正交表,共设计9种深松铲铲尖(图2)。

表1 试验因素与水平

Tab.1 Factors and levels of experiment

水平	铲形 A	入土角 B/($^\circ$)	张角 C/($^\circ$)
1	凿形(CS)	18	60
2	箭形(AS)	21	65
3	翼形(WS)	24	70

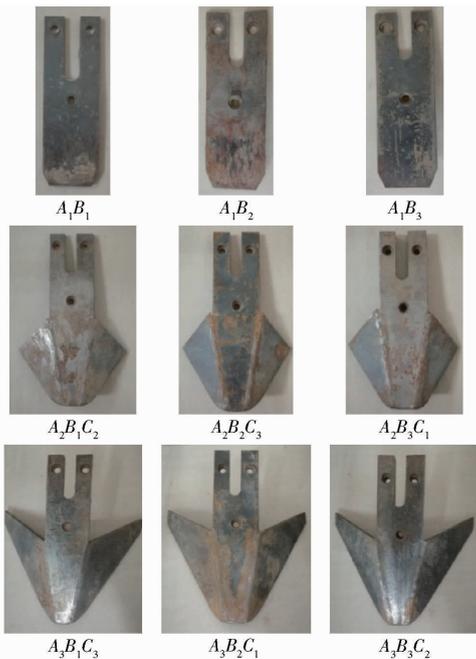


图2 9种深松铲铲尖

Fig.2 Nine types of subsoiler tine

每种铲尖重复3次试验,总计27次田间深松试验,深松试验距离60 m。以土壤扰动效果和节能减阻效果为评价指标,具体指标有深松沟横截面的土壤容重、孔隙度、紧实度、土壤扰动面积及阻力。于2013年4月底春玉米播种前进行了田间深松试验,检测了土壤容重、紧实度及深松沟形面积等相关指标。检测深松前土壤特性数据,作为对照CK组。

试验区地表秸秆覆盖量小于10%,表层留有上一年度的根茬。0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm土层紧实度分别为0.603、1.136、1.250 MPa;0~20 cm、20~40 cm土层的土壤容重分别为1.54、1.69 g/cm³,0~20 cm、20~40 cm土层的土壤质量含水率分别是19.2%和20.8%。

1.3 测试指标与方法

1.3.1 土壤容重与孔隙度

深松试验后,以深松沟中心线为基准,依次在深松沟形截面箭头所示位置(图3)用环刀采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 4个土层的土样,置于105℃条件下干燥,测试其土样容重,计算相应孔隙度

$$f = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 f ——孔隙度,%

ρ_b ——土壤容重,g/cm³

ρ_s ——土粒平均密度,在2.6~2.7 g/cm³之间,试验中取其平均值2.65 g/cm³

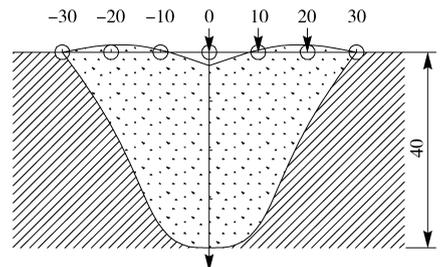


图3 深松沟截面示意图

Fig.3 Profile sketch of subsoiling trench

1.3.2 土壤紧实度

采用SC-900型紧实度仪,以深松沟中心为基准点,按照图3圆圈所示位置,检测深松沟截面各土层的土壤紧实度。紧实度每隔2.5 cm深度取值一次,直到深度达到45 cm。因此,检测的结果是60 cm(宽)×45 cm(深)的深松沟横截面土壤紧实度的矩阵分布图。采用等值线图绘制软件Surfer 8.0将所测的紧实度生成深松沟横断面的紧实度等值线图^[20]。

1.3.3 土壤扰动量

参照CHEN等^[21-22]研究开沟器对土壤扰动量的测试方法,试验中采用深松沟形面积法来测定土壤扰动量。首先采用透明塑料板贴紧深松沟截面,描绘出深松沟形的轮廓。再将塑料板平铺在单位为毫米的坐标纸上,数出深松沟形轮廓,计算出深松沟形面积。

1.3.4 深松铲牵引阻力

采用中国农业大学工学院研制的后悬挂农具田间试验平台测试深松铲牵引阻力 F 。具体测试过程

是将安装有试验深松铲的深松机架挂接在田间机具测试尾部,待深松铲入土作业稳定后,开始采集阻力数据,并通过无线局域网,将试验数据上传到计算机。

1.3.5 沟形面积比阻

为评价深松铲铲形及参数对深松沟扰动面积与牵引力的综合影响,参照 RAPER^[16]建立的沟形面积比阻 T 关系式

$$T = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中 T ——沟形面积比阻, kN/cm^2

F ——牵引力, kN

A ——深松沟截面积, cm^2

根据式(2)及其单位可知,沟形面积比阻的物理意义是指在一定作业速度下,深松铲扰动单位面积土壤所需的牵引力。沟形面积比阻越小越好,因为相对较小的沟形面积比阻说明较小的牵引力能获得较大的土壤扰动量。因此,相应铲形参数的深松

铲的深松节能效果越好。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 和 SPSS 19.0 对试验所测数据处理,进行单因素方差分析,采用 LSD 法进行显著性检验,显著水平为 $P = 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤扰动

2.1.1 土壤容重及孔隙度

表 2 是距深松沟中心 0 cm、10 cm 和 20 cm 位置 0 ~ 40 cm 深度土壤容重平均值。方差分析表明,对于深松沟中心,在深度 0 ~ 40 cm 土层,不同处理的容重均在 $0.9 \sim 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间,不同处理的土壤容重没有显著性差异。在距离深松沟中心 10 cm 或 20 cm 的位置,入土角 α 或张角 β 变化时,容重变化不显著。在距深松沟中心 10 cm 位置 20 ~ 40 cm 深度的土层和距深松沟中心 20 cm 位置 10 ~ 40 cm 深度的土层,深松铲铲形对容重有显著影响。

表 2 深松沟截面的容重 ρ

Tab.2 Bulk density of soil profile after subsoiling

g/cm^3

试验编号	距中心 0 cm 处				距中心 10 cm 处				距中心 20 cm 处			
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm
A_1B_1	1.08	1.06	1.37	1.23	1.14	1.34	1.48 ^a	1.51 ^a	1.09	1.43 ^a	1.34 ^a	1.51 ^a
A_1B_2	1.25	1.31	1.16	1.11	1.25	1.47	1.58 ^a	1.66 ^a	1.24	1.38 ^a	1.57 ^a	1.70 ^a
A_1B_3	1.17	1.25	1.20	1.21	1.23	1.28	1.43 ^a	1.55 ^a	1.03	1.62 ^a	1.76 ^a	1.72 ^a
$A_2B_1C_2$	1.20	1.12	1.11	1.25	1.33	1.35	1.28 ^b	1.43 ^b	1.36	1.42 ^a	1.62 ^b	1.58 ^b
$A_2B_2C_3$	0.92	1.15	1.15	1.16	1.18	1.25	1.47 ^b	1.40 ^b	1.10	1.53 ^a	1.64 ^b	1.62 ^b
$A_2B_3C_1$	1.30	1.15	1.13	1.27	1.22	1.21	1.29 ^b	1.45 ^b	1.20	1.47 ^a	1.73 ^b	1.53 ^b
$A_3B_1C_3$	1.20	1.18	1.18	1.27	1.27	1.30	1.29 ^b	1.21 ^c	1.38	1.47 ^b	1.44 ^c	1.46 ^c
$A_3B_2C_1$	0.93	1.11	1.07	1.19	1.30	1.40	1.43 ^b	1.36 ^c	1.12	1.23 ^b	1.33 ^c	1.49 ^c
$A_3B_3C_2$	0.95	1.10	1.12	1.04	1.31	1.35	1.34 ^b	1.26 ^c	1.21	1.30 ^b	1.37 ^c	1.47 ^c

注:同列数据相同字母上标表示不同处理之间差异不显著($P > 0.05$)。

如图 4a 所示,在距离深松沟中心 10 cm 位置的 0 ~ 20 cm 土层,容重均在 $1.1 \sim 1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间,不同处理的容重没有显著性差异,较深松前容重降低了 7.28% ~ 27.15%。在 20 ~ 30 cm 土层,不同铲形处

理的容重开始产生显著性差异,CS 铲对应的容重均值为 $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$,较 AS 铲和 WS 铲相应位置容重均值分别大 8% 和 10%。在 30 ~ 40 cm 深度,土壤容重有更显著差异,CS 铲、AS 铲、WS 铲 3 种铲形深松

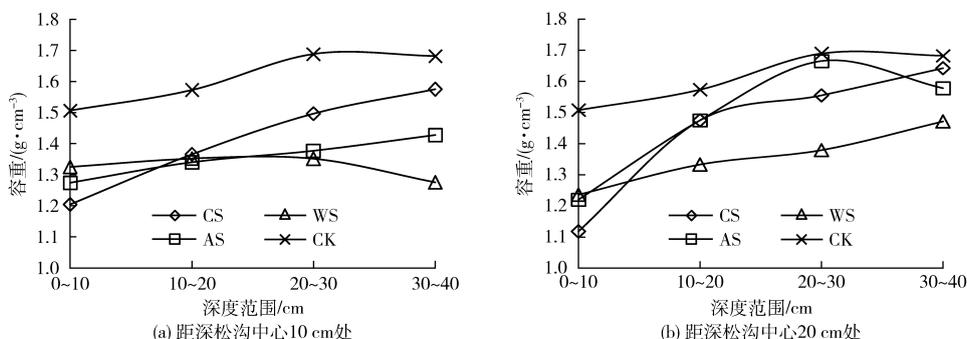


图 4 不同位点土壤容重变化曲线

Fig.4 Changing curves of soil bulk density at different points

后对应位置的容重均值依次降低,CS 铲对应的容重均为 1.57 g/cm^3 ,分别较 WS 铲和 AS 铲处理的大 18.5% 和 14.0%。

如图 4b 所示,在距深松沟中心 20 cm 位置,在 0~10 cm 土层,容重都低于 1.40 g/cm^3 ,没有显著性差异。在 10~40 cm 土层,不同铲形处理对应的容重均有显著性差异。图 4b 表明,10 cm 深度以下的土层,WS 铲的容重明显低于 CS 铲、AS 铲的容重值:在 10~20 cm 土层,WS 铲容重比 CS 铲、AS 铲容重小 11.0%;在 20~30 cm,WS 铲容重分别比 CS、AS 铲容重小 13%、21%;在 30~40 cm,WS 铲容重则分别比 CS 铲、AS 铲小 11.6%、7.48%。

由式(1)可知,土壤孔隙度与容重线性负相关。根据线性代数理论以及 2.1.1 节部分分析结果知,入土角 α 及张角 β 对土壤孔隙度没有显著性影响,而铲形的变化对孔隙度的变化有显著影响。

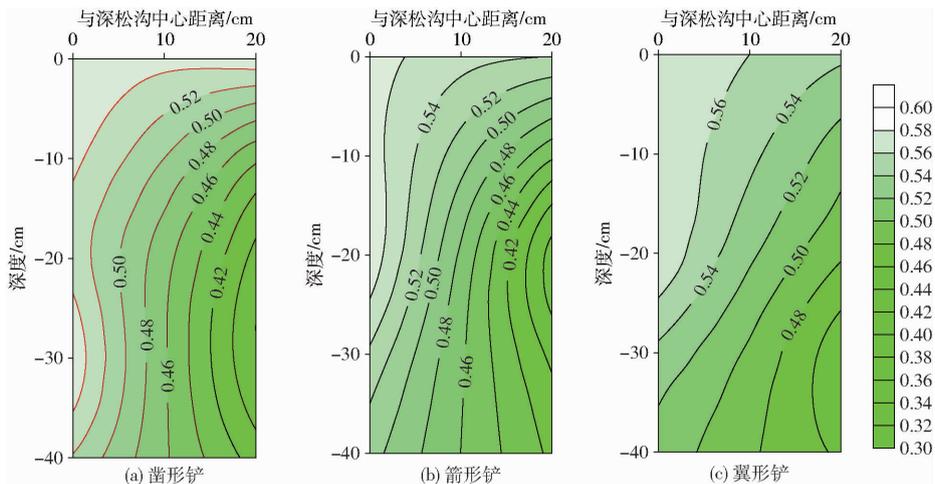


图 5 深松沟截面孔隙度等值线图

Fig. 5 Soil porosity contours of subsoiling trench profile

2.1.2 深松沟截面土壤紧实度

图 6 是深松沟截面和未深松土壤剖面紧实度等值线图。观察对比,铲形的变化对深松沟截面的紧实度有较显著影响,入土角 α 、张角 β 对紧实度的大小和分布没有显著影响。分析图 6a、6b、6c,紧实度等值线较密集,颜色由浅入深变化明显的区域即是深松区域向未深松区域的边界区,等值线的形状呈现出深松沟实际沟形。图 6d 表明,未深松的土壤在 15~25 cm 土层存在明显的犁底层,紧实度达到 2.8 MPa 以上。

在 0~15 cm 的土层,3 种铲形对应深松沟的紧实度分布特点及变化趋势基本一致。在 20 cm 深度,紧实度低于 0.6 MPa 的沟宽范围均在 60 cm 以上。在 20~40 cm 土层,不同铲形处理的紧实度分布有显著性差异,紧实度低于 0.6 MPa 的宽度随 CS 铲、AS 铲、WS 铲依次增大。在 25 cm 深度,3 种铲

图 5 是深松沟截面孔隙度等值线图。由图 5 知,在深松沟中心位置,0~40 cm 土层的孔隙度均在 0.5 以上。说明经深松之后,底层(20~40 cm)土壤得到有效疏松,在深松范围内,底层土壤达到与表层土壤相同程度的疏松。对比分析 3 组等值线图,图 5a、5b 比图 5c 的密集,说明 CS 铲、AS 铲深松沟在从深松沟中心向边缘位置的方向上,孔隙度的变化较 WS 铲深松沟的快。在距沟中心 10 cm 位置,土壤疏松程度差异较大,等值线密集的区域即是深松区域与未深松区域的过渡区域。WS 铲深松沟孔隙度等值线间隔较大,分布较疏松,说明 WS 铲深松沟从沟中心到 20 cm 位置范围内的土壤得到有效疏松。

综合分析图 4 容重曲线及图 5 孔隙度等值线可得,铲形的变化对土壤 20~40 cm 土层的容重有显著影响。凿形铲、箭形铲和翼形铲铲形宽度依次增加,对深层土壤的有效疏松范围逐渐增大。

形处理的沟形截面紧实度低于 0.6 MPa 的宽度分别约为 31 cm、45 cm 和 53 cm。

2.1.3 土壤扰动量

运用 Pro/E 5.0、CAD 绘图软件和扫描工具,将描绘在透明塑料纸上的深松沟实际沟形绘制成如图 7 所示的深松沟截面,并且借助坐标纸,可计算出深松沟形面积,如表 3 所示。分析表 3 的深松沟形面积知,深松铲的入土角 α 、张角 β 对土壤扰动量的影响不显著。

对比分析图 7 不同铲形的深松沟形可知,铲形的变化对土壤扰动面积有显著影响(表 4)。在深松深度相同条件下,铲形越宽,沟形越宽。CS 铲的沟形是窄“V”形,WS 铲的沟形是“U”形,AS 铲的沟形居凿形铲和翼形铲二者之间。对照图 6 中的紧实度等值线图可知,实际描绘的不同深松铲沟形与紧实度等值线中呈现的沟形基本一致。根据表 3 得,CS

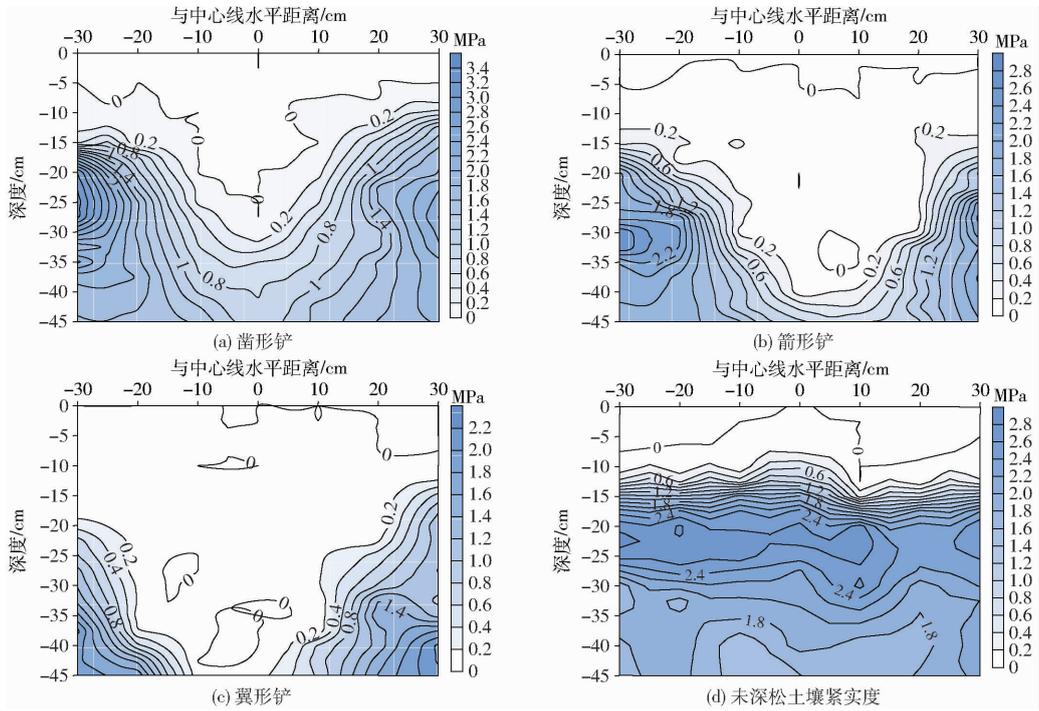


图 6 深松沟截面紧实度等值线图

Fig. 6 Contours of soil cone index of subsoiling trench profile

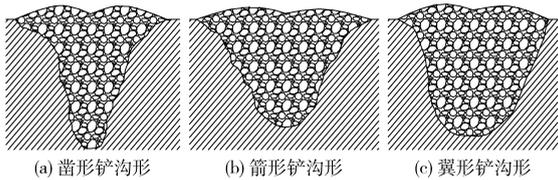


图 7 不同深松铲的深松沟形

Fig. 7 Subsoiling trench shapes of different subsoiling shanks

铲、AS 铲和 WS 铲的深松沟形面积均值分别为 941.4、1 085.05、1 410.36 cm²。WS 铲扰动面积分别比 CS 铲和 AS 铲大 49.8%、30.0%，AS 铲扰动面积比 CS 铲大 15.3%。

表 3 深松扰动面积与牵引阻力

Tab. 3 Subsoiling disturbance area and traction resistance

试验编号	沟形面积/ cm ²	牵引阻力/ kN	沟形面积比阻/ (kN·m ⁻²)
A ₁ B ₁	941.10 ^a	4.57 ^{aA}	48.56 ^a
A ₁ B ₂	921.90 ^a	3.95 ^{aB}	42.85 ^a
A ₁ B ₃	961.20 ^a	4.71 ^{aA}	49.00 ^a
A ₂ B ₁ C ₂	1 009.75 ^b	7.12 ^{bA}	70.51 ^b
A ₂ B ₂ C ₃	1 084.60 ^b	6.67 ^{bB}	61.47 ^b
A ₂ B ₃ C ₁	1 157.80 ^b	7.86 ^{bA}	67.89 ^b
A ₃ B ₁ C ₃	1 255.49 ^c	9.76 ^{cA}	77.71 ^b
A ₃ B ₂ C ₁	1 431.50 ^c	9.28 ^{cB}	64.83 ^b
A ₃ B ₃ C ₂	1 544.10 ^c	10.54 ^{cA}	68.26 ^b

注：同列内相同字母上标表示不同处理之间差异不显著；小写字母代表铲形的显著性，大写字母代表入土角的显著性。

综合分析土壤容重、孔隙度、紧实度和沟形面积的试验结果，铲形对土壤扰动的影响最显著，在 10 ~

表 4 试验统计分析结果

Tab. 4 Results of statistical analysis for experiment

参数	因素	偏差平方和	自由度	F	显著性
扰动面积	铲形	346 756.022	2	35.637	*
	入土角	34 774.007	2	3.574	
	张角	9 546.034	2	0.981	
	误差	9 730.200	2		
牵引阻力	铲形	44.567	2	571.372	**
	入土角	1.718	2	22.026	*
	张角	0.062	2	0.795	
	误差	0.080	2		
沟形面积比阻	铲形	957.500	2	55.026	*
	入土角	128.268	2	7.371	
	张角	10.265	2	0.590	
	误差	17.400	2		

注：* 差异显著，** 差异极显著。

20 cm 土层，凿形铲、箭形铲和翼形铲的深松宽度分别为 30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm、50 ~ 60 cm。在 20 ~ 40 cm 土层，3 种铲形的深松宽度分别是 10 ~ 18 cm、11 ~ 18 cm、21 ~ 30 cm。铲形的变化直接影响到深松沟底部区域土壤的疏松效果，从凿形铲到翼形铲，随着铲形宽度的增大，其扰动区域也依次增大。

2.2 深松铲牵引阻力

阻力测试(表 3)及方差分析结果(表 4)表明，张角 β 的变化对深松阻力 F 没有显著性影响，入土角 α 对深松铲所受阻力有显著影响。 α 从 18° 到 24° 依次增大时，阻力 F 先减小后增大，当 α 为 21° 时，

阻力均值为 6.63 kN,较最大值小 16.1%, α 为 24° 时,阻力达到最大值,整体上,阻力 F 呈增大趋势。

方差分析表明,铲形对深松铲阻力 F 有极显著影响, F 按 CS 铲、AS 铲和 WS 铲依次增大,其平均阻力分别是 4.41、7.22、9.86 kN。WS 铲所受阻力分别比 AS 铲和 CS 铲大 123.6% 和 36.6%。AS 铲比 CS 铲所受阻力大 63.7%。CS 铲、AS 铲和 WS 铲的铲面宽度依次增大是阻力因铲形而变化的一个重要原因。ABO-ELNOR 等^[23]认为,土壤耕作部件的宽度增加一倍,所受阻力会是原来的 120%,这与本试验结果基本一致。土壤与深松铲表面的接触面积的大小直接影响到摩擦力、切向粘附力^[24-25]的大小,CS 铲、AS 铲、WS 铲,3 类深松铲铲尖面积也是依次增大。铲尖面积越大,与土壤的接触面积就越大,故阻力越大。

2.3 沟形面积比阻

方差分析(表 4)表明,入土角 α 、张角 β 对沟形面积比阻影响不显著。铲形的变化对沟形面积比阻有显著影响。CS 铲、AS 铲和 WS 铲的沟形面积比阻平均值分别是 46.80、66.63、70.28 kN/m²。CS 铲的沟形面积比阻分别较 AS 铲和 WS 铲小 42.4% 和 50.2%,AS 铲的沟形面积比阻较 WS 铲的小 5.4%。AS 铲和 WS 铲对土壤虽然能造成相对较大的扰动面积,但所需的牵引力相对更大。AS 铲和 WS 铲的沟形面积比阻相差较小,而与 CS 铲的沟形面积比阻相差较大,说明 AS 铲和 WS 铲对土壤产生单位面积的深松扰动,所受牵引阻力比 CS 铲相差较大。从 CS 铲到 WS 铲,沟形面积比阻依次增大,铲形的变化是沟形面积比阻变化的重要原因。

由沟形面积比阻定义知,CS 铲的沟形面积比阻相对最小说明,CS 铲能以较小的牵引力获取相对最大区域的土壤扰动。即在相同作业条件下,对土壤产生相同面积的扰动,CS 铲所受牵引力要比 AS 铲和 WS 铲分别小 42.4% 和 50.2%。较 AS 铲和 WS 铲而言,CS 铲铲尖宽度最小,受到的阻力较小,但 CS 铲能对土壤造成截面积相对较大的扰动。

2.4 铲形及结构参数的优化选择

综合土壤土壤容重、孔隙度、紧实度、土壤扰动量和深松铲牵引阻力及沟形面积比阻的分析知:入土角 α 从 18° 增加到 24° 时,牵引阻力 F 先减小后增大,当 α 为 21° 时, F 达到最小值。因此,对于 3 种铲形,入土角 α 为 21° 时,深松铲的深松性能相对最好。张角 β 的变化对土壤扰动和阻力 F 的影响很小。从深松铲的制作成本角度分析,张角 β 为 60° 时,相对更加节省材料,深松铲制造成本相对较低。

凿形铲、箭形铲、翼形铲深松碎土效果依次增强,对土壤扰动量依次增大,但阻力 F 也依次增大。从沟形面积比阻角度综合评价,相对最优的铲形是入土角 α 为 21° 的凿形铲。若为获取相对较大的土壤扰动,则 α 为 21° 的翼形铲是相对较好的铲形。

3 结论

(1) 深松铲结构参数(入土角 α 、张角 β)的变化对土壤容重、孔隙度、紧实度没有显著性影响。铲形对土壤容重、孔隙度、紧实度和土壤扰动量的变化有最为显著的影响,3 类深松铲中翼形铲的深松扰动效果最好,其次是箭形铲,凿形铲的深松碎土区域最小。凿形铲、箭形铲到翼形铲,沟形面积依次增大,对 20~40 cm 深度的土壤的扰动区域依次增大。

(2) 铲形和入土角 α 对牵引阻力 F 有显著影响。 F 随入土角 α 的增大先减小再增大,当 α 为 21° 时阻力最小。 F 随铲形宽度的增大而增大,翼形铲所受阻力分别比箭形铲和凿形铲大 123.6% 和 36.6%。箭形铲比凿形铲所受阻力大 63.7%。

(3) 铲形对沟形面积比阻有显著影响。凿形铲、箭形铲到翼形铲,沟形面积比阻依次增大。凿形铲的沟形面积比阻分别较箭形铲和翼形铲小 42.4% 和 50.2%,箭形铲的沟形面积比阻较翼形铲的小 5.4%。

(4) 综合分析土壤特性、沟形面积、阻力 F 以及沟形面积比阻的变化特点,本试验条件下,入土角 α 为 21° 的凿形铲是相对较优的铲形。

参 考 文 献

- 1 罗锡文,李就好,朱余清,等. 耕作方式对砖红壤物理特性和含水率的影响[J]. 农业机械学报, 2006,37(12):62-66. LUO Xiwen, LI Jiuhao, ZHU Yuqing, et al. Effect of tillage methods on soil physical properties and moisture content of latosol[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(12):62-66. (in Chinese)
- 2 张瑞富,杨恒山,高聚林,等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015,31(5):78-84. ZHANG Ruifu, YANG Hengshan, GAO Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5):78-84. (in Chinese)
- 3 TAO Z, SUI P, CHEN Y, et al. Subsoiling and ridge tillage alleviate the high temperature stress in spring maize in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013,12(12):2179-2188.
- 4 邹洪涛,张玉龙,黄毅,等. 辽西北半干旱区土壤深松对玉米生长发育及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(4):475-477. ZOU Hongtao, ZHANG Yulong, HUANG Yi, et al. Effect of deep tillage on maize growth in the semi-arid region of liaoning northwest area [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009,40(4):475-477. (in Chinese)

- 5 张祥彩, 李洪文, 何进, 等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 77-82, 71.
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Sup. 1): 77-82, 71. (in Chinese)
- 6 李洪文, 陈君达, 李问盈. 保护性耕作条件下深松技术研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 42-45.
LI Hongwen, CHEN Junda, LI Wenyong. Study on subsoiling technique for conservation tillage field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 42-45. (in Chinese)
- 7 王微, 邱立春. 深松部件对深松作业质量影响的试验分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 179-182.
WANG Wei, QIU Lichun. Effect analysis of three kind of subsoiler carry on the deep tillage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1): 179-182. (in Chinese)
- 8 张绍军. 3种深松铲对深松作业效果影响研究[J]. 农业科技与装备, 2012(6): 23-25.
ZHANG Shaohun. Experimental analysis on the subsoiling effect of three subsoilers[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(6): 23-25. (in Chinese)
- 9 余永昌, 刘文艺, 赵迎芳, 等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 109-113.
YU Yongchang, LIU Wenyi, ZHAO Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 109-113. (in Chinese)
- 10 周桂霞, 汪春, 张伟, 等. 基于二次正交旋转回归试验的深松铲关键参数建模[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 86-89.
ZHOU Guixia, WANG Chun, ZHANG Wei, et al. Mathematic model of deep-shovel with critical structure parameter based on two times orthogonal rotational regressive tests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 86-89. (in Chinese)
- 11 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140422&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141-145. (in Chinese)
- 12 张强, 张璐, 于海业, 等. 复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 61-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120812&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.012.
ZHANG Qiang, ZHANG Lu, YU Haiye, et al. Finite element analysis and experiment of soil resistance of multiplex-modality subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 61-65. (in Chinese)
- 13 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80-88. (in Chinese)
- 14 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 1-13. (in Chinese)
- 15 RAPER R L. Subsoiler shapes for site-specific tillage[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(1): 25-30.
- 16 RAPER R L. Force requirements and soil disruption of straight and bent leg subsoilers for conservation tillage systems[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(5): 787-794.
- 17 RAPER R L. In-row subsoilers that reduce soil compaction and residue disturbance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(3): 253-258.
- 18 乔晓东, 王晓燕, 颜华, 等. 后悬挂农具田间试验平台[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 63-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.011.
QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Field experiment platform for rear suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 63-68. (in Chinese)
- 19 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 20 陈欢欢, 李星, 丁文秀. Surfer 8.0等值线绘制中的十二种插值方法[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 52-57.
CHEN Huanhuan, LI Xing, DING Wenxiu. Twelve kinds of gridding methods of Surfer 8.0 in isoline drawing[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1): 52-57. (in Chinese)
- 21 HASIMU A, CHEN Y. Soil disturbance and draft force of selected seed openers[J/OL]. Soil and Tillage Research, 2014, 140(1): 48-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.02.011>.
- 22 CHEN Y, MUNKHOLM L J, NYORD T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J/OL]. Soil and Tillage Research, 2013, 126(1): 34-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.08.008>.
- 23 ABO-ELNOR M, HAMILTON R, BOYLE J T. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(1): 61-73.
- 24 钱定华, 张际先. 土壤对金属材料粘附和摩擦研究状况概述[J]. 农业机械学报, 1984, 15(1): 69-78.
QIAN Dinghua, ZHANG Jixian. A summary of study of adhesion and friction between soil and metals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 15(1): 69-78. (in Chinese)
- 25 丛茜, 任露泉, 陈秉聪. 土壤粘附规律的化学吸附分析[J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 20-24.
CONG Qian, REN Luquan, CHEN Bingcong. Study on soil adhesion phenomena by chemical adsorption[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3): 20-24. (in Chinese)