

深松铲铲尖对土壤扰动过程及效果的试验与分析

杭程光¹, 黄玉祥^{1,2}, 高喜杰¹, 李伟¹, 朱瑞祥^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 铲尖是深松铲的关键部件之一, 其对土壤扰动产生重要影响。在分析铲尖对土壤扰动过程及影响机理的基础上, 以凿形铲、箭形铲、翼形铲为对象, 用碎土率、土壤蓬松度、土壤扰动系数、地表平整度等评价指标, 并用高速摄影技术进一步研究不同铲尖形状对土壤扰动过程及效果的影响。结果表明: (1) 铲尖形状对土壤扰动过程产生重要影响, 翼形铲作业形成垄沟的地表宽度及沟底宽度最大, 箭形铲次之、凿形铲最小; (2) 随深松铲铲尖与土壤接触面积及土块间的二次接触概率的增加, 土壤破碎效果不断改善, 采用凿形铲、箭形铲、翼形铲深松后, 10 cm 耕层的碎土率分别为 89.29%、90.87%、94.75%, 全耕层的碎土率分别为 85.09%、92.23%、96.13%; (3) 铲尖形状是影响土壤疏松程度和地表平整性的重要因素, 凿形铲对土壤的疏松效果较箭形铲与翼形铲差, 但其耕后地表平整度优于箭形铲与翼形铲。综合考虑作业质量、减阻效果、材料等因素, 应合理确定铲尖与土壤接触面积, 加强铲尖对土壤类型的适应性研究, 强化带翼凿式铲铲翼的合理布置位置及其结构参数的研究。

关键词: 深松铲; 铲尖; 土壤扰动; 高速摄影; 试验研究

中图分类号: S275 **文献标志码:** A

Experiment and analysis of the subsoiler tine shape to the soil disturbance process and effect

HANG Cheng-guang¹, HUANG Yu-xiang^{1,2}, GAO Xi-jie¹, LI Wei¹, ZHU Rui-xiang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Shaanxi Engineering Research center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Tine shape is one of the key components of subsoiler, and it has an important impact on soil disturbance. Based on the influence mechanism to analyze the tine shape to soil disturbance process, taking the chisel shovel, arrow shovel and wing shovel as the objects, using evaluation indexes such as soil breaking rate, soil bulkiness and loose degree, soil disturbance coefficient and soil surface roughness, and the high-speed photographic technique further researched the influence of different shovel shapes on the soil disturbance process and effect. The results were indicated: (1) The shovel shape would produced an important impact to the soil disturbance process, the furrow surface width and furrow bottom width were the highest when operated by the wing shovel, the arrow shovel was the second, and the chisel shovel was the minimum. (2) With increasing contact area of subsoiler shovel to soil and second contact probability between soil blocks, the soil crushing effect was continuously improved. Aftersubsoiling by using the chisel shovel, arrow shovel and wing shovel, soil breaking rate in 10 cm topsoil was 89.29%, 90.87% and 94.75% respectively, and soil breaking rate in whole topsoil was 85.09%, 92.23% and 96.13% separately. (3) The shovel shape was the important factor to influence soil loosening degree and soil surface roughness. The soil loose effect by chisel shovel was less than arrow shovel and wing shovel, but its soil surface roughness was better than arrow shovel and wing shovel. Comprehensively considered the factors as tillage quality, drag reduction effect, material and so on, the contact area of shovel tine to soil should be rationally confirmed, adaptable research of shovel to soil types should be enhanced, and the research of reasonable layout and its structure parameters of wing shovel should be strengthened.

Keywords: subsoiler; subsoiler tine shape; soil disturbance; high-speed photography; experimental research

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2017-05-10

基金项目: 陕西省科技攻关课题 (2013K02-11); 杨凌示范区科技计划项目 (2014NY-29); 2015 年西北农林科技大学重点项目 (Z101021501)

作者简介: 杭程光 (1992—), 男, 陕西西安人, 研究生, 研究方向为土壤-机器系统。E-mail: hcg@nwsuaf.edu.cn。

通信作者: 黄玉祥 (1980—), 男, 宁夏中宁人, 副教授, 博士, 主要从事土壤-机器系统研究。E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn。

机械深松具有活化犁底层、提高土壤蓄水保墒能力等作用,深松铲对土壤的扰动效果是影响土壤的疏松程度、蓄水保墒能力以及后续作业难易程度的重要因素^[1-4]。铲尖作为深松铲的关键部件之一,其对深松铲-土壤系统的相互作用过程及土壤扰动效果产生重要影响^[5-7]。研究深松铲铲尖对土壤扰动过程及效果的影响机理是提高深松作业质量的重要途径。

近年来,国内外学者围绕深松铲及其铲尖进行了大量研究。例如,Spoor 等^[6]研究表明,在翼形铲前加凿形铲对耕作阻力及土壤扰动量产生重要影响;Ahmet 等^[7]在耕深 25 cm 与 28 cm 条件下,研究了四种不同形状的铲对土壤扰动、圆锥指数、容重等指标的影响;Fiekle^[8]对十多种不同纵剖面的深松部件进行了对比与试验,结果表明,深松部件的水平力随耕作速度的增大显著增加;Badegaonkar 等^[9]通过仿真分析研究了铲尖入土角及长度对耕作效果的影响;Manuwa^[10]建立了不同铲尖的阻力预测模型,并分析了耕深对牵引力的影响;Tamás 等^[11]研究表明,翼形铲对土壤破坏方式及过程与凿形铲的相似;李洪文等^[12]研究发现,相比于单柱凿形式,采用可调翼形式深松,能够有效提高土壤的蓄水保墒能力,增加农作物产量;齐关宇等^[13]研究了铲尖对耕作阻力的影响,结果表明,牵引阻力随着深松铲与土壤接触面积的增加而增大;张绍军、王薇等^[14-15]研究发现,凿型深松铲在打破犁底层后改善土壤持水量、土壤温度、土壤坚实度和土壤微团聚体含量方面的综合作用效果优于箭形、翼形铲。现有研究主要对凿式铲受力及其数学模型进行了分析^[16-18],鲜有关于深松部件对土壤扰动过程及效果影响机理的报道。

为此,本研究以箭形、凿形、翼形等三种典型深松铲为对象,在分析铲尖对土壤扰动过程影响机理的基础上,采用高速摄影技术及土壤扰动效果的评价指标,深入研究了深松铲铲尖对土壤扰动过程及效果的影响,旨在为优化深松铲设计方案、提高深松作业质量提供决策依据。

1 铲尖对土壤扰动过程及效果的影响

深松铲-土壤互作用机理分析是研究铲尖对土壤扰动过程影响的关键。本研究以圆弧形铲柄为基础,分析了铲尖形状对土壤扰动过程及扰动效果的影响。

耕作机械对土壤产生切削、挤压等作用引起土壤失效、破碎的主要原因^[19-20]。当土壤的应力或应变超过屈服值,土壤的变形将导致应力重新分

布、载荷减少或土壤强度变大,从而引起土壤结构的失效与破碎^[21]。在深松过程中,深松铲与土壤接触的零部件主要包括铲柄与铲尖,其与土壤之间的相互作用是引起土壤破碎的主要因素。为准确分析铲尖对土壤扰动过程的影响,对深松铲与土壤之间的互作用力进行了分析,如图 1 所示。

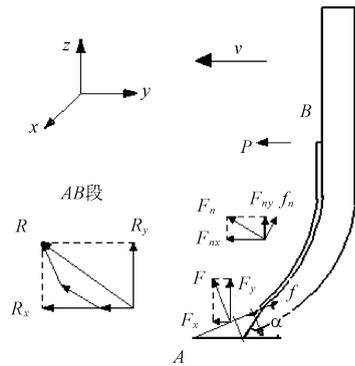


图 1 深松铲-土壤系统受力分析

Fig. 1 Force analysis for subsoiler-soil system

由图 1 可知,土壤主要受到深松铲铲尖的正压力 F (方向垂直于铲尖表面) 以及深松铲表面的摩擦力 f (沿铲尖斜面向后), 将 F 分解成水平分力 F_x 及垂直分力 F_y , F_x 主要将土壤向前推动, F_y 将土壤向上方抬升; 将深松铲圆弧段对土壤的作用力进行微元分析, 土壤主要受到垂直于铲柄刃口的切削力 F_n 及摩擦力 f_n (沿圆弧切线方向向上), F_n 主要对切土刃角辐射范围内土壤进行切削, 并将土壤向两侧挤压, f_n 使土壤沿铲柄圆弧切线方向运动; 表层土壤主要受到垂直于直铲柄段的挤压力 P 的作用, 土壤在挤压力的作用下产生土袋裂纹, 土袋裂纹随深松铲的前进逐渐扩大直至破裂、松碎。在不考虑土壤之间相互扰动作用的影响时, 土壤的主要运动过程如图 2 所示。其中, v 为深松铲前进方向, $S_1 - S_9$ 为土壤的运动方向。

如图 2 所示, 当深松铲沿 y 轴负方向运动时, 在 F_x 作用下, 土壤沿 S_1 方向向前运动; 在 F_y 作用下, 土壤沿 S_2 方向向上运动, F_x 与 F_y 的综合作用导致土壤在地表堆积, 形成斜面, 并随深松铲前进沿 S_3 方向向后运动; 在摩擦力 f 作用下, 土壤沿 S_3 方向地表以下向后流动, 与已经破裂的土壤发生相互扰动, 进一步提高土壤的破碎程度。与凿式铲相比, 带翼铲两侧翼的存在将对土壤的运动过程及扰动范围产生重要影响, 在深松铲侧翼对土壤的挤压力 F'_1 与 F'_2 的作用下, 土壤将沿 S_6 方向向深松铲两侧运动, 扩大土壤扰动轮廓。地表土壤在切削力 F_n 及挤压力 P 的作用下随深松铲的前进沿 S_4 方向向前运动、沿 S_5 方向向后运动及沿 S_7 方向两侧运动; 同

时,土壤在重力作用下,沿 S_8 方向运动,回填深松形成的垄沟;由于铲柄切土刃的分流作用,沿 S_9 方向

向后运动。

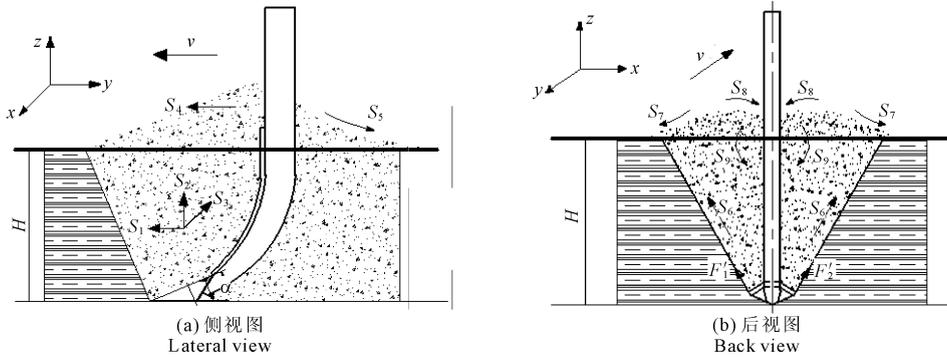


图2 深松铲-土壤系统相互作用过程

Fig.2 The interaction process of subsoiler-soil system

深松铲与土壤相互作用过程中,铲尖形状的差异不仅会引起土壤的运动过程发生变化,同时也会对土壤扰动状态及土壤之间的相互扰动作用产生影响。相比于凿式铲,带翼铲的两侧翼将会在一定程度上增大土壤的扰动范围及扰动量;铲尖与土壤接触面积越大,土壤之间的相互扰动作用越强,这不仅会增加土块之间的二次接触概率,同时也会引起土壤运动过程发生改变,从而导致土壤的破碎程度及土壤的扰动状态产生差异。

另外,深松作业条件较为复杂,田间土壤硬度分布均匀性,秸秆残茬等土壤杂物也会在一定程度上影响深松铲对土壤的扰动过程及扰动效果。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验在西北农林科技大学机械与电子工程学院数字化土槽试验台内开展,牵引动力为 TCC-2.1 电力四驱农机土槽试验台车。

试验用铲柄为圆弧形深松铲柄,铲柄切土刃角为 60° ,铲柄厚度为 30 mm。试验共选用三种铲尖,分别为凿形铲、翼形铲和箭形铲。

试验土壤为塋土,重壤质,属于黄土母质上发育的农业土壤。耕层土壤干密度为 $1.346 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[22-23],含水率为 16.54%。

2.2 试验方法

2.2.1 高速摄影技术 目前,高速摄影技术在农业领域已有广泛的应用^[24-25]。在深松过程中,难以用肉眼准确地观察到土壤的运动过程及运动轨迹。为此,采用 I-SPEED TR 型高速摄影机,以 $750 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时间分辨率对不同铲尖条件下的深松过程进行记录,并使用 i-SPEED Suite 软件对记录过程进行重现,通过对整体影像及特定时刻的图像进行分

析,研究铲尖对土壤扰动及运动过程的影响。试验过程中,高速摄影机镜头垂直于机具前进方向放置,与水平面的夹角为 35° ,其布置位置如图 3 所示。

2.2.2 土壤扰动效果的评价指标 深松铲对土壤扰动效果的影响主要体现在土壤扰动量、地表状态、土壤破碎状态等方面,因此,本研究采用土壤扰动度、土壤蓬松系数、耕后地表平整度等指标,研究铲尖对土壤扰动效果的影响。碎土率、土壤蓬松度、土壤扰动系数、耕后地表平整度的测定及计算方法参考 GB/T 24675.2-2009^[26]。

2.3 试验过程

为保证土槽内的土壤条件符合大田土壤环境,试验采用分层处理的方法,根据大田土壤参数制备土槽土壤。首先,取出距离土槽表面 20 cm 土层的土壤,使用 1GQN-125 型旋耕机将剩余土壤旋耕 3 遍,再采用 HCD80 型振动冲击夯对其进行压实;其次,在压实的土层表面喷洒适量自来水,随后均匀回填挖出的部分表层土壤(约 10 cm),渗透 2 d 后用旋耕机将表层土壤全面松碎、打匀,并用滚子压实;最后,对处理后的表土再度喷洒适量自来水,均匀回填剩余土壤,并用滚子压实。土槽土壤制备过程中,保证土壤含水率在 12%~17% 之间,20 cm 土层深度内的土壤硬度为 $5 \sim 10 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$,20 cm 以下土层深度内的土壤硬度达到 $10 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

为保证试验过程的一致性,取前 3 m 为土槽车加速区,后 3 m 为减速区域,中间 20 m 为有效试验距离。试验在耕深为 300 mm、速度为 $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下,分别采用凿形、箭形、翼形深松铲进行。试验过程中,采用高速摄影获取了深松过程图像,旨在分析铲尖对土壤扰动及运动过程的影响;按 GB/T 24675.2-2009 规定对耕深、土壤扰动轮廓截面等参数进行测量,为研究铲尖对土壤扰动效果的影响提

供依据。土槽土壤制备及土壤扰动轮廓截面测量过程如图 4 所示。

3 结果与讨论

3.1 铲尖对土壤扰动过程影响的高速摄影分析

理想状态下深松铲 - 土壤系统的互作用过程分析不足以准确说明铲尖对土壤扰动过程的影响。为此,本研究借助高速摄影技术对深松过程进行了记录,并采用 i - SPEED 软件对其进行了重现,对不同土块的运动状态进行了标定与对比,从而研究不同铲尖对土壤扰动及运动过程的影响。不同铲尖深松铲作业过程中,土壤扰动及运动状态如图 5 所示(高速摄影图像按时间顺序排列,红色箭头为土壤运动方向)。

由高速摄影结果可知,不同铲尖深松铲的土壤破碎过程存在一定差异。与凿式铲相比,采用带翼铲深松时,铲尖将土壤沿铲尖正压力 F (垂直于铲尖斜面)的相反方向向前上方挤压,铲尖刃口对土壤进行切削,当某一断面的剪切力达到土壤抗剪强度极限时,形成土堡裂纹,土壤发生剪切破坏,在地表形成扇形的土壤破碎轮廓,且该轮廓随深松铲的前进方向逐渐扩大;随着机具的前进,土壤在被深松铲向前推动的同时,沿垂直于深松铲侧翼表面的方向向



图 3 高速摄影机布置位置
Fig.3 Site layout of high-speed camera



图 4 土槽土壤制备及土壤扰动轮廓截面测量过程
Fig.4 Soil preparation and measuring process of soil disturbance profile section



图 5 不同铲形对土壤破碎及运动过程影响对比

Fig.5 The influence comparison of soil crushing and motion process with different shovel shape

两侧推动,土堡裂纹逐渐扩大,土壤结构发生破裂,形成较大的土块,土块受到土壤与铲尖之间摩擦力的作用,沿铲尖侧翼表面向后运动;由于运动过程中,受到铲柄切土刀的剪切作用、直铲柄段的挤压作用以及土壤之间的相互扰动作用,导致土块结构进一步破裂、松碎。

由图5可知,不同深松铲作业时,土壤的运动过程存在较大差异。采用凿形铲作业时,土壤的主要运动方向包括:受铲尖推土作用及铲柄挤压作用随深松铲的前进向前运动(O)、受重力作用回填深松铲的垄沟(P)、受铲尖抬土作用被深松铲抬升(Q)以及受土壤之间的相互扰动作用,部分土壤沿深松铲前进方向向两侧运动($O \rightarrow O_2$)。采用带翼铲(箭形、翼形铲)进行深松时,土壤的主要运动方向与凿形铲基本一致,但由于土壤受铲尖侧翼的挤压力 F'_1 与 F'_2 及土壤之间的相互扰动作用,在扩大土壤扰动轮廓的同时,增加了沿铲前进方向向两侧运动土壤的量(如土块 V 、 Y),同时增加了土块间二次接触的概率,从而引起土壤的扰动状态产生差异。

根据试验前划分的白色线框的变化情况可知,不同铲尖深松铲的土壤扰动范围存在一定差异。为进一步分析铲尖对土壤扰动量的影响,根据深松带土壤扰动截面轮廓,对不同铲尖深松铲的土壤扰动截面轮廓曲线进行了拟合,如图6所示。

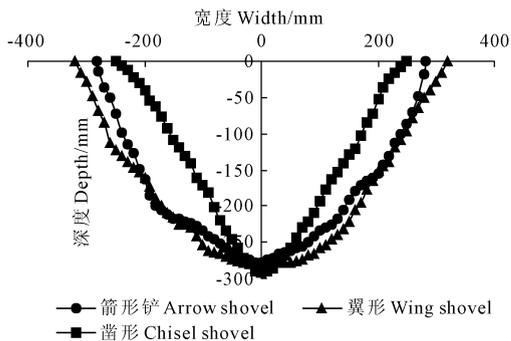


图6 不同铲形的土壤扰动轮廓曲线

Fig.6 The profilogram of soil disturbance with different shovel shape

由图6可知,翼形铲作业形成垄沟的地表宽度及沟底宽度最大,箭形铲次之,凿形铲最小。其中,凿形、箭形、翼形铲垄沟的地表宽度分别为495.67、564.00、643.33 mm,翼形铲与箭形铲的沟底宽度差异较小。这主要是由于,凿形、箭形、翼形铲的铲尖最大宽度分别为60、100、150 mm,翼形铲对土壤的扰动作用最大,箭形铲次之;深松铲的入土角为 23° ,深松铲尖的最大宽度位置位于铲尖与铲柄的接合处(距沟底约为6.4 cm),因此翼形铲尖与箭形铲尖在

沟底位置与土壤的接触宽度差异较小,同时随着深度的减小(在铲尖与铲柄的接合处),土壤之间的相互扰动作用逐渐增大,铲尖宽度对土壤扰动宽度的影响随之减小,从而导致翼形铲与箭形铲的沟底宽度差异较小。另外,土壤扰动轮廓也受到土壤之间相互扰动作用的影响,翼形铲两侧翼引起的土壤之间的相互扰动作用较箭形铲与凿形铲强,其扰动轮廓截面也大于箭形铲与凿形铲,这与理论分析的结果一致。

3.2 不同铲尖对土壤扰动效果的影响

3.2.1 碎土率 碎土率主要反映了土壤受扰动后的破碎效果。由高速摄影图像可知,不同深松铲作业后,地表土壤的破碎状态存在较大差异,凿形铲的大土块数量明显多于箭形铲与翼形铲。为准确衡量铲尖形状对碎土效果的影响,对10 cm耕层及全耕层的碎土率进行了测量,如表1所示。

表1 不同铲形深松铲的碎土率

耕层范围 Topsoil range	铲形 Shovel shape	碎土率/% Soil-breaking rate
10 cm 耕层 10 cm topsoil	凿形铲 Chisel shovel	89.29
	箭形铲 Arrow shovel	90.87
	翼形铲 Wing shovel	94.75
全耕层 Whole topsoil	凿形铲 Chisel shovel	85.09
	箭形铲 Arrow shovel	92.23
	翼形铲 Wing shovel	96.13

由表1可知,凿形、箭形、翼形铲在10 cm耕层的碎土率分别为89.29%、90.87%、94.75%,全耕层的碎土率分别为85.09%、92.23%、96.13%,即翼形铲的碎土效果最好,箭形铲次之,凿形铲最差。引起这一现象的原因主要是:第一、土壤间的相互扰动作用随铲尖与土壤接触面积的增加而增大,试验采用的凿形铲、箭形铲、翼形铲与土壤的接触面积分别为6 640、9 735、13 995 mm^2 ,因此翼形铲对土壤的破碎效果最好,箭形铲次之;第二、土块间的二次碰撞会引起土块的进一步松碎,由高速摄影结果可知(图5),采用翼形铲深松时土壤块的运动过程最为复杂,因此其引起土块间二次碰撞的概率最大,故其碎土效果较箭形铲与凿形铲更好。

3.2.2 土壤蓬松度与土壤扰动系数 土壤蓬松度和土壤扰动系数主要反映土壤的被疏松状态。深松作业要求土壤扰动系数较大,土壤蓬松度较小^[26]。根据试验后测绘的土壤垄形截面图及土壤扰动轮廓截面图,计算可得土壤蓬松度、土壤扰动系数,如表2所示。

由表 2 可知,采用不同铲尖深松铲作业后,土壤的被疏松状态存在较大差异。其中,凿形铲的土壤蓬松度最大、土壤扰动系数最小,分别为 21.03%、51.81%,即凿形铲对土壤的疏松效果较箭形铲与翼形铲差;同时,翼形铲的耕前地表至实际深松沟底的横断面面积大于箭形铲,但其土壤蓬松度及土壤扰动系数却小于箭形铲,这主要是由于采用凿形、箭形、翼形铲垄沟的地表宽度分别为 499、564、643 mm,较大的地表宽度将会引起耕前地表至理论深松沟底

的横断面面积随之变大,从而引起土壤蓬松度及土壤扰动系数呈发生变化。因此,铲尖表面积不宜过大,但适当增大铲尖表面积能够在一定程度上提高深松铲对土壤疏松效果。

3.2.3 耕后地表平整度 耕后地表平整度是反映深松铲对地表土壤扰动状态的评价指标^[26],其对播种等后续作业产生重要影响。试验后在每个深松行程各取三个位置对耕后地表平整度数据进行了测量并对比,如表 3 所示。

表 2 土壤蓬松度和土壤扰动系数

Table 2 Soil bulkiness and loose degree and soil disturbance coefficient

铲形 Shovel shape	A_s /mm ²	A^q /mm ²	A_h /mm ²	$A_h - A_q$ /mm	土壤蓬松度 Soil bulkiness and loose degree/%	土壤扰动系数 Soil disturbance coefficient/%
凿形铲 Chisel shovel	73876.57	142589.39	172577.06	29987.67	21.03	51.81
箭形铲 Arrows shovel	108730.16	156978.12	184544.85	27566.73	17.56	69.26
翼形铲 Wing shovel	110122.45	181419.06	212791.66	31372.60	17.29	60.70

表 3 耕后地表平整度

Table 3 Soil surface roughness after tillage

位置 Position	铲形 Shovel shape	H_1 /mm	H_2 /mm	H_3 /mm	H_4 /mm	H_5 /mm	H_6 /mm	H_7 /mm	H_8 /mm	H_9 /mm	H_{10} /mm	H_{11} /mm	H /mm	地表平整度 Soil surface roughness
位置 1 Position 1	凿形 Chisel tine	43	57	57	44	30	53	67	67	58	47	—	52.3	11.499
	箭形 Arrow shaped tine	31	45	68	68	56	47	34	56	58	37	—	50.0	13.350
	翼形 Sweep	23	37	47	70	54	34	46.5	67.5	72	57	35	50.8	16.411
位置 2 Position 2	凿形 Chisel tine	51	69	71	75	38	49	74	88	77	60	—	65.2	15.317
	箭形 Arrow shaped tine	26	37	51	60	72	59	75	63	43	25	—	51.1	17.848
	翼形 Sweep	30	47	72	78.5	72.5	48.5	62	77.5	78	47	30	61.3	17.095
位置 3 Position 3	凿形 Chisel tine	38	61	71	52	49	73	75	67	44	18	—	54.8	18.207
	箭形 Arrow shaped tine	21	49	79	87	88	73	87	88	52	29	—	65.3	25.695
	翼形 Sweep	22.5	30.5	60	68	58.5	61	76	96	95	54	35	62.2	23.829

由表 3 可知,凿形铲深松后,位置 1、位置 2、位置 3 的耕后地表平整度分别为 11.499、15.317、18.027,均小于箭形铲、翼形铲在同位置的地表平整度,即凿形铲的耕后地表平整度优于箭形铲与翼形铲。产生这一现象的主要原因是,深松过程中凿形铲对土壤的扰动作用较小,土壤的主要运动状态包括抬升、前进、回落,向两侧的移动较少,从而引起地表土垄的平均高度较大,但由于回落土壤较多,回填了深松形成的垄沟,提高了地表的平整程度;采用箭形、翼形铲作业时,深松铲对土壤的扰动作用较强,增加了向两侧运动土壤的量,虽然有利于降低地表土壤高度,但由于回落土壤的量减小,导致地表土壤高度差较大,耕后地表平整度较差。

3.3 讨论

(1) 铲尖与土壤的接触面积对耕作阻力、土壤扰动效果及耕后地表平整度产生影响。铲尖与土壤

接触面积过大,会增大耕作阻力^[13]、降低耕后地表平整度;铲尖与土壤接触面积过小,会导致土壤扰动和碎土效果变差。因此,铲尖面积不宜过大或过小,综合考虑作业质量、减阻效果、材料等因素,合理确定铲尖与土壤的接触面积,有利于提高耕作质量、降低能源消耗。

(2) 研究表明,不同铲尖对土壤类型的适应性不同,其对土壤的扰动效果及理化性状的改善效果均有较大差异。例如,箭形铲或翼形铲适用于多年耕作的熟土地,凿形铲可有效保证荒地的开垦效果。因此,根据不同土壤类型,确定先进、适用的铲尖形状是未来深松铲优化设计的关键问题之一。

(3) 相比于带翼铲与凿式铲,带有铲翼的凿式铲不仅可以提高土壤的蓄水保墒能力,同时可有效保证土壤的理化性状、疏松效果及碎土效果。铲翼的布置位置及其结构参数对深松作业质量产生重要

影响。铲翼过高会造成深松铲对地表土壤的过度扰动,降低地表平整度;同时,铲翼过大将会增加耕作阻力。因此,需要加强带翼凿式铲铲翼的合理布置位置及其结构参数的研究,从而为深松铲结构设计提供依据。

4 结论与建议

1) 采用高速摄影技术,进一步验证了不同铲尖对土壤扰动过程及扰动范围的影响。铲尖形状对土壤扰动过程产生重要影响,不同铲尖的土壤扰动范围存在较大差异,翼形铲作业形成垄沟的地表宽度及沟底宽度最大,箭形铲次之、凿形铲最小。同时,相比于凿式铲,带翼深松铲会增大沿侧翼向两侧运动土壤的量,从而增加土块间二次接触过程,引起土壤的运动状态发生较大改变。

2) 随深松铲铲尖与土壤接触面积及土块间的二次接触概率的增加,土壤破碎效果不断改善,采用凿形铲、箭形铲、翼形铲深松后,10 cm 耕层的碎土率分别为 89.29%、90.87%、94.75%,全耕层的碎土率分别为 85.09%、92.23%、96.13%。因此,采用带翼铲进行深松作业有利于土壤的破碎。

3) 铲尖形状是影响土壤被疏松程度和地表平整性的重要因素,凿形铲对土壤的疏松效果较箭形铲与翼形铲差,但其耕后地表平整度优于箭形铲与翼形铲。同时,现有研究表明,深松耕作阻力随铲尖与土壤接触面积的增大显著增加^[13]。因此,铲尖面积不宜过大,但适当增大铲尖与土壤接触面积能够在一定程度上提高深松铲对土壤的疏松效果。

4) 综合考虑作业质量、减阻效果、材料等因素,合理确定铲尖与土壤接触面积,加强铲尖对土壤类型的适应性研究,强化带翼凿式铲铲翼的合理布置位置及其结构参数的研究,有助于深松铲的优化设计,对于提高耕作质量,减少能源消耗具有重要意义。

参考文献:

- [1] Hu J, Li H L, Deng J Y, et al. Improved design of column subsoiler using finite element analysis[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(4): 70-79.
- [2] Li B, Liu F Y, Xia R, et al. Distinct element method analysis and experiment of a biomimetic subsoiler[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(1): 47-54.
- [3] Li X, Tang M J, Zhang D X, et al. Effects of sub-soiling on soil physical quality and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 65-69.
- [4] 王慧杰,郝建平,冯瑞云,等.微孔深松耕降低土壤紧实度提高棉花产量与种籽品质[J].农业工程学报,2015,31(8):7-14.
- [5] 李霞,张东兴,王维新,等.受迫振动深松机参数优化设计与性能试验[J].农业工程学报,2015,31(21):17-24.
- [6] Spoor G, Godwin R J. An experimental investigation into the loosening of soil by rigid tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1978, 23(3): 243-257.
- [7] Ahmet C, Randy L R. Design and evaluation of ground-driven rotary subsoilers[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124(4): 203-210.
- [8] Fiekle J M. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(1): 61-72.
- [9] Badegaonkar U R, Dixit G, Pathak K K. An experimental investigation of cultivator shank shape on draft requirement[J]. Archives of Applied Science Research, 2010, 2(6): 246-255.
- [10] Manuwa S I. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(2): 399-405.
- [11] Tamás K, Jóri I J, Mouazen A M. Modelling soil sweep interaction with discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134(8): 223-231.
- [12] 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,2000,30(6):42-45.
- [13] 齐关宇,刘林,赵艳忠,等.深松铲入土深度及铲形对耕作阻力影响[J].农机化研究,2015,37(11):161-165.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Edward M. Soil Cutting and Tillage[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1985.
- [17] Araya K. Soil failure caused by subsoilers with pressurized water injection[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 58(4): 279-287.
- [18] Godwin R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(2): 331-340.
- [19] Perfect E, Diaz Z M, Grove J H. A prefractal model for predicting soil fragment mass - size distributions[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 64(1-2): 79-90.
- [20] Ibarra S Y, McKyes E, Broughton R S. A model of stress distribution and cracking in cohesive soils produced by simple tillage implements[J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42(2): 115-139.
- [21] Gill W R, VandenBerg G E. Tillage and Soil Dynamics[M]. Washington, D.C.: Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture, 1967.
- [22] 杨有刚,张宏,冯涛,等.土壤浅深松联合松耕机设计和浅松土试验[J].机械工程学报,2012,48(19):163-168.
- [23] 黄玉祥,杭程光,李伟,等.深松作业效果试验及评价方法研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(11): 228-234.
- [24] 欧阳玉平,洪添胜,苏建,等.山地果园牵引式双轨运输机断绳制动装置设计与试验[J].农业工程学报,2013,30(18): 22-29.
- [25] 唐忠,李耀明,赵湛,等.夹带损失传感器不同安装位置对子粒检测精度的影响[J].农业工程学报,2012,28(10):46-52.
- [26] 陈治文,杨兆文,潘一兵,等.保护性耕作机械-深松机:GB/T 24675.2-2009[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 & 中国国家标准化管理委员会,2009.