

网络出版时间:2016-10-09 10:08

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.11.029

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161009.1008.058.html>

深松耕作阻力的影响因素分析与减阻策略

杭程光¹, 黄玉祥^{1,2}, 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】【目的】识别深松耕作阻力的关键因素及其影响程度,为深松减阻技术与装备研究奠定基础。【方法】采用7因素3水平正交试验和单因变量方差分析方法,研究深松机铲形(箭形、凿形)、铲距(300,400,500 mm)、入土角(18°,23°,28°)、土壤含水率(10%,15%,20%)、土壤坚实度(1 000,1 500,2 000 kPa)、耕深(250,300,350 mm)及牵引速度(2,3,4 km/h)对深松耕作阻力的影响。【结果】铲形、铲距、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度的检验概率依次为0.613,0.057,0.056,0.495,0.013,0.001和0.797;不同因素对耕作阻力影响程度的排序为耕深>土壤坚实度>入土角>铲距>土壤含水率>铲形>牵引速度,且耕深、土壤坚实度、入土角、铲距对深松耕作阻力变化影响显著。【结论】为减小深松耕作阻力、提高耕作质量,建议在满足农艺要求的前提下,深松深度的确定应以“耕作层+犁底层”的厚度为主要依据;深松作业间隔年限的确定应将土壤坚实度作为重要评价指标;合理配置深松铲的入土角和铲距有助于减小深松作业阻力和提高作业质量。

【关键词】 深松; 保护性耕作; 耕作阻力; 减阻策略

【中图分类号】 S220.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)11-0202-07

Influencing factors and reduction strategies of subsoiling tillage resistance

HANG Chengguang¹, HUANG Yuxiang^{1,2}, LI Wei¹, ZHU Ruixiang^{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: 【Objective】 This study analyzed key factors and influences on subsoiling tillage resistance to provide basis for subsoiling resistance reduction technology and equipment. 【Method】 The influences of tine shape (arrow tine and chisel tine), tool spacing (300,400, and 500 mm), rake angle (18°,23°, and 28°), soil moisture content (10%,15%, and 20%), soil hardness (1 000,1 500, and 2 000 kPa), tillage depth (250,300, and 350 mm) and speed (2,3, and 4 km/h) on subsoiling tillage resistance were analyzed by $L_{27}(3^7)$ orthogonal experiment method and analysis of variance for single dependent variable. 【Result】 The test probabilities of tine shape, tool spacing, rake angle, soil moisture content, soil hardness, tillage depth and speed were 0.613,0.057,0.056,0.495,0.013,0.001 and 0.797, respectively. Effects of different factors were in a decreasing order of tillage depth>soil hardness>rake angle>tool spacing>soil moisture content>tine shape>speed. The effects of tillage depth, soil hardness, rake angle, and tool spacing were significant. 【Conclusion】 To reduce tillage resistance and increase tillage quality, with the premise of agromomic requirement, reasonable tillage depth should be determined by the depth of ‘plough layer + plow

【收稿日期】 2016-04-01

【基金项目】 陕西省科技攻关项目(2013K02-11);杨凌示范区科技计划项目(2014NY-29);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,在读硕士,主要从事土壤-机器系统研究。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,硕士生导师,主要从事土壤-机器系统研究。

E-mail:hyx@nwsuaf.edu.cn

pan'. Soil hardness should be regarded as an important evaluation index to decide interval time of subsoiling operation. Rational allocation of rake angle and tool spacing of subsoiler contributed to reducing tillage resistance and improved tillage quality.

Key words: subsoiling; conservation tillage; tillage resistance; reduction strategy

深松作业作为保护性耕作的主要技术之一,具有改善耕层土壤结构、提高土壤蓄水保墒能力等作用,能够有效地保护耕地质量,促进农业的可持续发展^[1-5]。2010年,中央1号文件要求“大力推广深松整地”作业,并出台了深松整地补贴政策,2015年全国全年深松整地面积达到1 350万 hm^2 。由于深松机具的配套动力较大,作业功率消耗一般为收获机械的3~5倍^[6]。随着全国深松作业面积的不断扩大,如何减少耕作阻力,降低能源消耗是深松技术与装备研究面临的突出问题。

目前,国内外学者围绕深松耕作阻力的影响因素开展了大量研究,主要集中于深松机结构参数、土壤物理特性参数、深松作业条件参数等方面^[7-11]。例如,Mouazen等^[12-14]研究了深松铲入土角对耕作阻力的影响,并确定了4种深松铲铲柄倾角与铲尖倾角的最优组合;Shahgoli等^[15-16]研究表明,在3 km/h的牵引速度下,入土角为 22.5° 的深松铲节能减阻效果最佳;Awad-Allah等^[17]研究了牵引机具速度以及深松铲入土角对耕作阻力的影响;Camacho-Tamayo等^[18]研究了土壤含水率及作业速度对耕作阻力的影响;Li等^[19]采用离散元方法研究了耕深、速度等因素对耕作阻力的影响;齐关宇等^[20]研究了铲形及铲尖与土壤接触面积对耕作阻力的影响,表明耕作阻力随铲尖与土壤接触面积的增加显著增大。但现有研究侧重于分析某一个或某几个因素对耕作阻力的影响,且以单因素试验为主。然而,深松耕作阻力受多种因素的协同影响,单因素研究具有较大的局限性,不足以准确评价不同因素对耕作阻力的影响程度。为此,本研究试图通过多因素试验,确定影响深松耕作阻力的主要因素及其影响程度,旨在为降低深松耕作阻力,及确定深松减阻方案提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验因素及水平的选取

合理选取各因素的水平是保证研究有效性的前提。在分析国内外研究现状的基础上^[7-11],结合田间土壤物理特性参数试验、深松机行业标准(JB/T 9788—1999)及已有研究成果^[7,17,21-22],确定铲距、铲

形、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度等参数为试验因素。

(1)铲形(s)与铲距(d)。目前,通用深松铲铲形主要包括凿形、箭形和翼形。其中,凿形、箭形铲铲间距的调整范围一般为300~500 mm,例如高茂盛等^[23]研究的手扶拖拉机专用深松机,深松行距为400~500 mm;翼形铲的铲距一般为600~800 mm。由于翼形铲与凿形、箭形铲铲距的合理选取范围存在较大差异,为保证因素水平选取的合理性和可比性,铲型选取1种凿形铲及2种不同的箭形铲,铲距分别选取300,400和500 mm 3个水平。铲尖形状如图1所示。

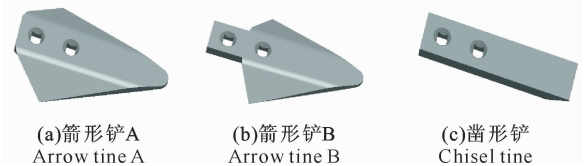


图1 试验用深松铲铲尖的形状

Fig. 1 Tine shapes of subsoiler used in experiment

(2)入土角(α)。入土角是深松铲的关键结构参数之一,其对深松铲作业性能具有重要影响。从现有研究及实际应用来看,入土角的选取范围一般为 $18^\circ\sim 28^\circ$ ^[12-16,24]。本研究选取 $18^\circ, 23^\circ, 28^\circ$ 作为入土角的3个水平。

(3)土壤含水率(sm)和土壤坚实度(sh)。为确保土槽土壤制备的合理性,试验前对杨凌地区的农田土壤含水率及土壤坚实度分布状况进行了测量,不同时间段该区土壤含水率为10%~20%(不含雨后),平均土壤坚实度小于2 000 kPa,测量过程如图2所示。根据实际测量结果,选取土壤含水率(耕层)的3个水平为10%,15%和20%;平均土壤坚实度的3个水平为1 000,1 500和2 000 kPa。

(4)耕深(h)。深松深度主要依据农艺要求确定,目前深松深度一般为250~400 mm;同时,不同区域土壤结构存在一定差异,“耕作层+犁底层”的深度通常为250~350 mm。因此,选取250,300和350 mm为耕深的3个水平。

(5)牵引速度(v)。拖拉机牵引速度主要依据深松机作业的稳定性和作业效率确定。目前,深松作

业速度一般小于 5 km/h,在综合考虑深松机作业性能及试验平台性能的条件下,选取牵引速度的 3 个水平分别为 2,3 和 4 km/h。



图 2 田间土壤含水率及土壤坚实度的测量
Fig.2 Measurement process of soil moisture content and hardness in field

在确定试验因素及水平的基础上,设计 $L_{27}(3^7)$ 正交试验进行分析,正交试验的因素和水平见表 1,试验共进行 27 组。

表 1 耕作阻力影响因素正交试验的因素与水平
Table 1 Orthogonal factor levels of tillage resistance

因素 Factor	水平 Level		
	1	2	3
s	箭形 A Arrow tine A	箭形 B Arrow tine B	凿形 Chisel tine
d/mm	300	400	500
$\alpha/(\text{^\circ})$	18	23	28
$sm/\%$	10	15	20
sh/kPa	1 000	1 500	2 000
h/mm	250	300	350
$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	2	3	4

1.2 试验方案

深松过程中,由于田间土壤环境较为复杂,秸秆残茬及土壤杂物等因素均会对耕作阻力产生较大影响,从而造成试验误差。为准确控制试验变量,避免不确定因素对试验结果造成影响,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内展开,试验动力由 TCC-2.1 电力驱动车提供。试验土壤为塬土,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 g/cm^3 [22,25]。

在测定田间土壤物理特性参数的基础上,采用分层方法制备土槽土壤。首先,取出距土槽表面 200 mm 的土层,使用 1GQN-125 型旋耕机将剩余土壤旋耕松碎,并用镇压辊子压实;其次,在压实的土层表面泼洒定量(土壤实际含水率与设定含水率差值的 1/2)的自来水,随后均匀回填挖出的部分土壤(约 100 mm),渗透 2 d 后用旋耕机将表面土壤松碎、打匀,并用辊子压实;最后,对处理后的土层再喷

洒定量(土壤初步处理后的实际含水率与设定含水率之间的差值)自来水,均匀回填剩余土壤,并用辊子压实。土壤制备过程中,自来水的喷洒量通过未加水前实际的土壤含水量与理论含水量之间的差值进行确定;通过土壤硬度计对土壤坚实度进行测量,并通过打夯次数以及辊子镇压次数控制 0~150 mm 土层土壤坚实度小于 1 000 kPa,150~300 mm 土层土壤坚实度为 1 000~2 000 kPa,使土壤坚实度分布呈上虚下实状态,并控制其平均土壤坚实度在试验设计的范围内。试验过程中,为保证试验条件的一致性,取前 3 m 为土槽车加速区,后 3 m 为土槽车减速区,中间 20 m 为有效试验距离。土槽土壤制备及含水率测量过程如图 3 所示。



图 3 土壤制备及含水率测量
Fig.3 Measurement of soil preparation and moisture content

土槽土壤制备过程中,土壤坚实度及含水率无法精确控制,因此采用土壤坚实度及含水率的实测值替换设置的试验水平进行分析。试验测得土壤坚实度的 3 个实际水平分别为 968.55,1 437.65 和 1 929.95 kPa;土壤含水率的 3 个实际水平分别为 11.17%,14.56%和 19.75%。

1.3 单因变量方差分析

单因变量多因素方差分析主要用于研究多因素试验中不同水平以及各因素间相互作用对因变量的影响。在采用 SPSS 进行方差分析时,离差平方和(Sum of Squares of Deviations,SS)共有 4 种,其中 Type I SS 和 Type II SS 适用于均衡数据、无交互效应的模型;Type III SS 和 Type IV SS 适用于非均衡数据、有交互效应的模型。当被分析数据无缺失值时,一般选取 Type I SS 和 Type III SS 对方差分析结果进行输出,若自变量中不存在交互效应时,Type I SS 和 Type III SS 的输出结果是完全一致的,反之则自变量中存在交互作用。

本研究拟通过 7 因素 3 水平正交试验,研究不同因素对耕作阻力的影响程度,属单因变量多因素试验。因此,选用 SPSS 软件的单因变量方差分析模块,设定主效应模型,以耕作阻力为因变量,铲距、

铲形、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度为自变量,分别采用 Type I SS 及 Type III SS 对方差分析结果进行输出,获取各因素与耕作阻力之间的检验概率,旨在确定不同因素之间是否存在交互作用以及各因素对耕作阻力的影响程度。

表 2 耕作阻力影响因素的正交试验结果
Table 2 Orthogonal test of influencing factors of tillage resistance

序号 No.	d/mm	s	sm/%	$\alpha/(^{\circ})$	sh/kPa	h/mm	$\frac{v}{(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})}$	耕作阻力/kN Tillage resistance
1	300	凿形 Chisel tine	19.75	23	1 437.65	250	4	4.38
2	300	凿形 Chisel tine	19.75	28	968.55	300	3	5.23
3	300	凿形 Chisel tine	19.75	18	1 929.95	350	2	5.98
4	300	箭形 A Arrow tine A	14.56	28	1 437.65	300	2	4.67
5	300	箭形 A Arrow tine A	14.56	23	1 929.95	250	3	5.38
6	300	箭形 A Arrow tine A	14.56	28	968.55	350	4	5.07
7	300	箭形 B Arrow tine B	11.17	23	968.55	250	2	4.51
8	300	箭形 B Arrow tine B	11.17	28	1 929.95	300	4	5.74
9	300	箭形 B Arrow tine B	11.17	18	1 437.65	350	4	5.69
10	400	凿形 Chisel tine	11.17	28	968.55	350	3	5.6
11	400	凿形 Chisel tine	14.56	18	1 929.95	250	3	5.25
12	400	凿形 Chisel tine	14.56	23	1 437.65	300	2	5.54
13	400	箭形 A Arrow tine A	11.17	18	968.55	250	2	4.82
14	400	箭形 A Arrow tine A	11.17	23	1 929.95	300	4	7.15
15	400	箭形 A Arrow tine A	19.75	28	968.55	350	3	6.23
16	400	箭形 B Arrow tine B	19.75	23	968.55	300	3	6.52
17	400	箭形 B Arrow tine B	19.75	18	1 437.65	250	4	3.72
18	400	箭形 B Arrow tine B	19.75	23	1 437.65	350	4	6.75
19	500	凿形 Chisel tine	11.17	28	968.55	250	2	5.00
20	500	凿形 Chisel tine	11.17	18	1 929.95	300	4	6.41
21	500	凿形 Chisel tine	14.56	23	1 929.95	350	2	6.54
22	500	箭形 A Arrow tine A	11.17	23	1 929.95	350	2	7.33
23	500	箭形 A Arrow tine A	19.75	18	968.55	300	3	4.47
24	500	箭形 A Arrow tine A	19.75	28	1 437.65	250	4	4.84
25	500	箭形 B Arrow tine B	14.56	28	1 929.95	250	3	5.78
26	500	箭形 B Arrow tine B	14.56	18	1 437.65	300	2	5.72
27	500	箭形 B Arrow tine B	14.56	18	1 437.65	350	3	6.03

为确定不同因素对耕作阻力的影响程度及试验因素之间是否存在交互作用,以耕作阻力为因变量,铲距、铲形、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度等因素为固定因子,在主效应模型下,分别采用 Type I SS 和 Type III SS 输出分析结果,单因变量方差分析的复相关系数为 0.998,决定系数为 0.996,调整后的决定系数为 0.992(由软件分析过程直接获取),决定系数高,即分析结果准确性较好。分析结果如表 3 所示。由表 3 可知,采用 Type I SS 输出结果时,铲形、铲距、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度的检验概率依次为 0.000,0.049,0.019,0.206,0.010,0.001 和 0.797,铲形、耕深在 1%水平影响显著,土壤坚实度、入土角、铲距在 5%水平影响显著;采用 Type III SS 输出结果

2 结果与分析

$L_{27}(3^7)$ 试验共获取 27 组有效的耕作阻力数据,结果如表 2 所示。

时,铲形、铲距、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度的检验概率依次为 0.613,0.057,0.056,0.495,0.013,0.001 和 0.797,耕深在 1%水平影响显著,土壤坚实度在 5%水平影响显著,铲距、入土角在 10%水平影响显著。采用不同离差平方和输出方差分析结果时,铲距、入土角的显著性水平存在较大差异,即说明不同变量之间存在交互效应。由于 Type III SS 主要用于存在交互效应、无缺失的数据分析中,因此采用 Type III SS 输出的方差分析结果更加准确。

由 Type III SS 输出结果可知,耕深、土壤坚实度、入土角、铲距对深松耕作阻力变化有显著影响,不同因素对耕作阻力的影响程度排序为:耕深>土壤坚实度>入土角>铲距>土壤含水率>铲形>牵

引速度。

表 3 耕作阻力影响因素的单因变量方差分析结果
Table 3 Variance analysis of single dependent influence factor of tillage resistance

源 Sources	I 型 Type I					III 型 Type III				
	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom of degree	均方 Mean square	变异数 Variation number	显著性 Significant level	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom of degree	均方 Mean square	变异数 Variation number	显著性 Significant level
校正 Correction	854.617	15	56.974	221.450	0.005***	854.617	15	56.974	221.450	0.000***
<i>s</i>	837.357	3	279.119	1 084.890	0.000***	0.262	2	0.131	0.509	0.613
<i>d</i>	2.019	2	1.010	3.925	0.049**	1.884	2	0.942	3.662	0.057*
<i>a</i>	0.929	2	0.464	1.805	0.019**	1.901	2	0.951	3.695	0.056*
<i>sm</i>	2.869	2	1.435	5.576	0.206	0.384	2	0.192	0.746	0.495
<i>sh</i>	3.613	2	1.806	7.022	0.010**	3.282	2	1.641	6.378	0.013**
<i>h</i>	7.710	2	3.855	14.985	0.001***	7.710	2	3.855	14.985	0.001***
<i>v</i>	0.119	2	0.060	0.232	0.797	0.119	2	0.060	0.232	0.797
误差 Error	3.087	12	0.257			3.087	12	0.257		
总计 Total	857.705	27				857.705	27			

注：“*”、“**”、“***”分别表示 10%、5% 及 1% 水平上的显著性影响。
Note: “*”, “**” and “***” refer to significant difference at 10%, 5% and 1%, respectively.

3 讨论与结论

1) 耕深是影响深松耕作阻力的最主要因素。现有研究表明,农田土壤结构主要包括耕作层、犁底层、心土层,且各土层厚度受土壤类型、种植结构、浅层耕作时间及土壤压实程度等因素的影响,不同区域土层结构分布存在较大差异,“耕作层+犁底层”的厚度一般为 250~350 mm^[26-27]。当深松深度过大时,深松铲在打破犁底层的同时将扰动心土层土壤,从而降低土壤的蓄水保墒能力,不利于土壤结构的保护及农作物的生长。因此,合理选择耕深对保护耕层土壤结构及减少耕作阻力均具有重要意义。

目前,我国深松作业深度一般为 250~400 mm,但实际深松过程中,部分用户追求土壤的被疏松效果,选择较大的耕深进行深松,这不仅增大了耕作阻力及能耗,同时也增加了破坏土层结构的风险。因此,在满足农艺要求的基础上,对小区域内的土层结构分布状况进行测定,根据“耕作层+犁底层”的实际厚度确定深松深度,可以达到保护农田土壤结构、提高土壤蓄水保墒能力的作用,同时也有助于降低深松耕作阻力。

2) 土壤坚实度对深松耕作阻力影响显著。土壤坚实度可以反映土壤抵抗外力压实或破碎的能力,其对深松耕作阻力具有显著影响。土壤在外加压力下受到剪切、挤压等作用,导致土壤内部结构产生变形与失效,土壤由整体状态分离为细小的土块^[28-29],而外加压力是机具牵引阻力的重要组成部分。深松过程中,深松铲铲尖及铲柄圆弧段刃口对土壤的切

削作用是造成土壤破碎的主要原因。当土壤坚实度较小时,土壤抵抗外力破碎的能力较弱,土壤破碎所需的外力较小,耕作阻力也较小;反之,当土壤坚实度较大时,耕作阻力也较大。因此,选择合理的土壤坚实度条件进行深松,对降低耕作阻力具有重要作用。

目前,在我国适宜深松的地区,深松间隔年限一般为 2~4 年,主要根据免耕、深松和翻耕等耕作方法及其轮耕体系对作物产量、土壤蓄水性能的影响进行确定^[30],并未充分考虑土壤坚实度状况。土壤坚实度对土壤的物理、化学、生物性状均具有显著影响,较大的坚实度将会导致土壤的透气性、透水性变化,不利于农作物的生长。研究表明,土壤含水率及机械压实对土壤坚实度具有重要影响^[8,10]。因此,土壤坚实度可以作为深松间隔时间确定的依据,适墒条件下,在土壤坚实度尚未对土壤理化性状及作物生长产生危害之前进行深松,不仅能够减少消除机械压实造成的功率消耗、降低深松耕作阻力,同时也有助于保护土壤的理化性状。

3) 合理配置入土角是减小耕作阻力的重要途径。入土角是深松铲设计的关键参数之一,其对深松耕作阻力会产生重要影响。深松作业时,深松铲-土壤系统之间的相互作用引起土壤之间产生挤压、剪切、拉伸等效应是造成土壤结构失效、破碎的重要因素,而入土角的变化对深松铲-土壤系统的相互作用过程有重要影响。McKyes^[31]指出,深松部件与土壤相互作用过程中,深松铲的推土作用随入土角的增大而增加,抬土作用随入土角的增大而减小,当

入土角较大时,深松铲在前进方向上受到土壤的阻碍作用较大,从而引起耕作阻力增大。在靠近深松铲位置,过大或过小的入土角将会导致土壤锥体及土壤背棱的产生,土壤锥体及土壤背棱均会削弱深松铲对土壤的切削作用,增加深松铲切削土壤所需的外加压力,导致耕作阻力增大。同时,深松过程中,受土壤条件、耕深稳定程度及弹性元件变形的影响,深松铲的入土角会在一定范围内波动,从而引起作业效果及耕作阻力发生较大变化。综上可知,深松铲入土角的配置应该限定在一定范围内,较小的入土角能够降低深松作业的耕作阻力。

4) 铲距对深松耕作阻力产生重要影响。铲距是深松机布局的重要参数,对深松耕作阻力及耕作效果的影响主要体现在两个方面:第一,多铲的协同作用是影响土壤之间相互扰动的重要因素,而这种扰动主要受铲距变化的影响。当铲距较小时,铲与铲之间的协同作用较强,铲尖斜面及铲柄切土刃口之间的协同作用能够有效地增大土壤之间的相互扰动,降低土壤破碎所需的外加压力,从而降低耕作阻力;第二,间隔深松的主要目的是形成“虚实并存”的“W”型土壤结构,在耕层内形成“富水区”与“贫水区”,提高土壤的蓄水保墒能力,从而促进农作物的生长。当铲距过小时,双铲之间的土壤将完全被扰动,土壤结构将呈现“U”型,并不能使土壤水分呈贫富相间分布。综上可知,合理配置深松铲间距对耕作阻力及耕作效果均具有重要意义,铲距的选取应该在合理的范围内,不宜过大,也不宜过小。

实际深松过程中,铲距的选择多依靠经验,且凿形、箭形、翼形深松铲间距的选取存在较大差异,并无配置标准。因此,针对不同铲形,在充分考虑耕作质量、作业效果及作业效率的前提下,确定深松铲间距的合理配置方案,是降低耕作阻力,优化深松机布局方式,提高作业质量的重要途径。

5) 为确定不同因素对深松耕作阻力的影响程度,本研究选取铲距、铲形、入土角、土壤含水率、土壤坚实度、耕深、牵引速度等影响耕作阻力的通用因素,进行了 27 组正交试验,采用 SPSS 软件对试验结果进行分析,结果表明:耕深、土壤坚实度、入土角、铲距对耕作阻力的变化影响显著,不同因素对耕作阻力影响程度的排序依次为:耕深>土壤坚实度>入土角>铲距>土壤含水率>铲形>牵引速度。

为减小深松耕作阻力、提高耕作质量,对影响深松耕作阻力的主要因素进行了综合分析,可以得到

以下结论:第一,在满足农艺技术对深松深度要求的前提下,耕深主要依据“耕作层+犁底层”的厚度确定;第二,深松作业间隔年限的确定应将土壤坚实度作为重要评价指标;第三,合理配置深松铲的入土角和铲距是降低深松作业阻力、提高作业质量的重要途径。

[参考文献]

- [1] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions [J]. Soil & Tillage Research, 2005, 82(2): 121-145.
- [2] Ahmad N, Qadir G. Effect of subsurface soil compaction and improvement measures on soil properties [J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2007, 9(3): 509-513.
- [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.
Wang H J, Hao J P, Feng R Y, et al. Microhole subsoiling decreasing soil compaction, and improving yield and seed quality of cotton [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 7-14.
- [5] 郑 侃, 何 进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7-15.
Zheng K, He J, Li H W, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 7-15.
- [6] 李 霞, 张东兴, 王维新, 等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 17-24.
Li X, Zhang D X, Wang W X, et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 17-24.
- [7] 李 霞, 张东兴, 张 瑞, 等. 土壤物理特性对深松阻力影响的试验 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 34-39.
Li X, Zhang D X, Zhang R, et al. Experiment of subsiding draught under different soil physical properties [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2014, 35(1): 34-39.
- [8] 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.
- [9] 张金波, 佟 金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141-145.
Zhang J B, Tong J, Ma Y H. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141-145.
- [10] 李汝莘, 高焕文, 苏元升. 土壤容重和含水量对耕作阻力的影响 [J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 81-85.

- Li R S, Gao H W, Su Y S. Effect of soil bulk density and moisture content on the draft resistance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1998, 14(1): 81-85.
- [11] Botta G F, Jorajuria D, Balbuena R, et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sun flower (*Helianthus annuus* L.) yields [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 91(1): 164-172.
- [12] Mouazen A M, NemeÅnyi M. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 51(1): 1-15.
- [13] Mouazen A M, NemeÅnyi M. Tillage tool design by the finite element method; Part 1. finite element modeling of soil plastic behavior [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(1): 37-51.
- [14] Mouazen A M, NemeÅnyi M. Tillage tool design by the finite element method; Part 2. experimental validation of the finite element results with soil bin test [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(1): 53-58.
- [15] Shahgoli G, Saunders C, Desbiolles J, et al. The effect of oscillation angle on the performance of oscillatory tillage [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1): 97-105.
- [16] Shahgoli G, Fielke J, Desbiolles J, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage [J]. Soil & Tillage Research, 2010, 106(2): 202-210.
- [17] Awad-Allah M A, Mahgoub H M, Abo-Elnor M E, et al. Experimental investigation of the effect of vibration during tillage process of multi shank plough blade [J]. Aerospace Sciences & Aviation Technology, 2009, 13: 1-16.
- [18] Camacho-Tamayo J H, Rodríguez B, Gonzalo A. Evaluation of tillage tools at different working speeds and soil water contents [J]. Agricultural Tecnica, 2007, 67(1): 60-67.
- [19] Li B, Liu F Y, Mu J Y, et al. Distinct element method analysis and field experiment of soil resistance applied on the subsoiler [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2014, 7(1): 54-59.
- [20] 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.
- Qi G Y, Liu L, Zhao Y Z, et al. Effects of subsoiler's penetrating depth and spade shape on traction resistance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11): 161-165.
- [21] 辛丽丽, 李传琦, 梁继辉, 等. 考虑分段土壤作用力的振动减阻分析 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 136-140.
- Xin L L, Li C Q, Liang J H, et al. Vibrating drag reduction considering acting force of piecewise soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 136-140.
- [22] 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.
- Huang Y X, Hang C G, Li W, et al. Subsoiling test and evaluation methodology study of tillage quality [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(11): 228-234.
- [23] 高茂盛, 薛少平, 廖允成, 等. 手扶拖拉机专用深松机果园试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 35-39, 62.
- Gao M S, Xue S P, Liao Y C, et al. Subsoiling technique in apple orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 35-39, 62.
- [24] 薛惠岚, 杨林青, 廉登极, 等. 双翼深松铲设计参数的试验研究 [J]. 西北农业大学学报, 1987, 15(1): 24-29.
- Xue H L, Yang L Q, Lian D J, et al. Tests of designing parameters of double-wing subsoiler [J]. Journal of Northwest Agricultural University, 1987, 15(1): 24-29.
- [25] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 70-78.
- Huang Y X, Hang C G, Yuan M C, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 70-78.
- [26] 虞 娜, 金鑫鑫, 安 晶, 等. 玉米田耕层不同类型土壤孔隙及库容特征的研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(6): 685-690.
- Yu N, Jin X X, An J, et al. Characteristics of soil pore size distribution and soil reservoir capacity in different corn cropland top soil [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(6): 685-690.
- [27] 白 伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西地区土壤耕层及养分状况调查分析 [J]. 土壤, 2011, 43(5): 714-719.
- Bai W, Sun Z X, Zheng J M, et al. Soil plough layers and soil nutrients in Western Liaoning [J]. Soils, 2011, 43(5): 714-719.
- [28] 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): 79-90.
- [29] 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.
- [30] 王玉玲, 李 军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作田土壤生产性能的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 107-116.
- Wang Y L, Li J, Bai W X. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 107-116.
- [31] McKyes E. Soil cutting and tillage [M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1985.