

轮胎压实对机具作业能耗的影响^{*}

陈浩¹ 杨亚莉¹ 何进² 王庆杰² 李洪文²

(1. 上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 针对华北平原小麦、玉米一年两熟区固定道保护性耕作,进行了节能效应的研究,对比分析了固定道与非固定道下机具田间作业的能耗。深松作业时,固定道保护性耕作比非固定道保护性耕作油耗降低23.7%,其中纯行走油耗降低23.8%,纯作业油耗降低36.3%。夏玉米和冬小麦播种作业时,固定道保护性耕作分别比非固定道保护性耕作油耗减少23.9%和26.0%。两年试验期,相对于非固定道保护性耕作,固定道保护性耕作平均减少总作业燃油消耗27.09 L/hm²,节油率为28.6%。研究结果表明,固定道保护性耕作通过区分机具行走道和作物生长带,改善机具行走性能,减少机具对作物生长带的压实,明显降低了机具田间作业的能耗,具有明显的节能优势。

关键词: 保护性耕作 固定道 压实 作业能耗

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)02-0037-06

Effect of Wheel Compaction on Fuel Consumption of Agricultural Machinery in Field Operation

Chen Hao¹ Yang Yali¹ He Jin² Wang Qingjie² Li Hongwen²

(1. Automotive Engineering College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

The effect of controlled traffic with conservation tillage (CTCT) on fuel consumption in annual two crops region in northern China was analyzed to illustrate its advantage on energy saving, thus further to promote its application. When subsoiling, fuel consumption of CTCT was reduced by 23.7%, in which trafficking fuel consumption was reduced by 23.8% and working fuel consumption was reduced by 36.3%, compared to non-controlled traffic with conservation tillage (NCTCT). While in maize and wheat planting, fuel consumption reduction was reduced by 23.9% and 26.0%, respectively. For the two-year period, compared to NCTCT, CTCT significantly reduced fuel consumption by 28.6% (27.09 L/hm²) in average. Results indicated that CTCT was a useful way to reduce agricultural machine field fuel consumption by separating traffic and crop zone, therefore to reduce working resistance force.

Key words Conservation tillage, Controlled traffic, Soil compaction, Fuel consumption

引言

在现有的保护性耕作系统中,拖拉机和农具在田间任意行走带来的压实问题逐渐凸现出来。土壤压实会影响几茬作物的产量、破坏土壤结构、增加

径流和土壤侵蚀。华北地区是典型的高投入、高产农业模式,机器配备量大、作业能耗比较高、作业时间短。如果将所有作业工序累加,土壤压实面积累计可达到100%。压实增加机具作业的压力,增加动力消耗,加剧环境污染,不利于农业的可

收稿日期: 2011-02-15 修回日期: 2011-04-03

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51175499)、上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金资助项目(GJD09012)和上海工程技术大学科研启动基金资助项目(09-12)

作者简介: 陈浩,副教授,主要从事地面力学研究, E-mail: pschenhao@163.com

通讯作者: 李洪文,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术研究, E-mail: lhwen@cau.edu.cn

持续发展^[1]。

国外的研究经验表明,固定道保护性耕作可以解决现有农业生产系统中存在的问题。固定道保护性耕作减少土壤压实、减小农具耕作阻力和改善车轮附着性能、提高作业效率、减少机器作业能耗,从而降低生产作业成本。在同样的产出下,固定道作业可以减少油耗至少40%,减少拖拉机的动力需求30%^[2~5]。

我国北方一年一熟区的固定道保护性耕作技术研究表明,固定道保护性耕作具有改良土壤、减少生产投入、降低成本等明显优势^[6~10]。我国北方一年两熟区固定道保护性耕作技术研究才刚开始,需要进行系统的固定道保护性耕作效应研究,评价固定道保护性耕作系统在我国中、小机具作业条件下的适应性,为该技术的推广应用奠定良好的理论基础。

动力消耗是评价固定道保护性耕作节能效应的重要指标。国外虽有大型机具固定道作业能耗的研究,但是在我国中小型机具为主的作业条件下,固定道保护性耕作节能效应研究较少,缺乏定量的固定道保护性耕作节能效应研究。本文选取典型的华北一年两熟区建立固定道保护性耕作试验区,在前期固定道保护性耕作系统机具作业阻力和牵引性能研究的基础上^[11~12],通过大量田间试验,定量研究固定道保护性耕作的节能优势,为固定道保护性耕作在我国北方一年两熟地区推广提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区

试验区位于北京市大兴区,年平均气温10~12℃,无霜期180~200 d,年平均降雨量约600 mm。试验地土壤类型为沙壤土,土壤平均有机质质量比小于1.0 g/kg,土壤肥力中等偏下。种植冬小麦-夏玉米一年两熟作物,冬小麦10月播种,6月收获;夏玉米在小麦收获后立即播种,10月收获。

1.2 试验设计

北京地区保护性耕作已经成为主要的种植模式。根据北京地区保护性耕作实际情况,试验方案如表1所示。

表1 试验因素和水平

Tab.1 Experiment factors and levels

水平	因素	
	耕作方式	压实情况
1	免耕	压实
2	深松	不压实
3	传统	

试验设置4种处理,其中为了保证固定道作业系统的可推广性,所有固定道系统以北京地区常用的TN654型拖拉机为基础进行设计,如图1所示。

(1)固定道免耕:小麦收获后直接进行玉米免耕播种。玉米收获后,秸秆粉碎,免耕播种小麦。作业时,拖拉机、播种机和小麦收获机行走在固定道上。

(2)固定道深松:在小麦收获后,玉米播种前进行深松作业,深度为30 cm。玉米收获后,秸秆粉碎,免耕播种小麦。作业时,拖拉机、播种机和小麦收获机行走在固定道上。

(3)非固定道免耕:小麦收获后直接使用固定道小麦/玉米免耕播种机^[11](调整行距为70 cm)进行玉米免耕播种,喷洒除草剂。玉米收获后,秸秆粉碎,免耕播种小麦,行距为19 cm。作业时,拖拉机、播种机和小麦收获机在田间非固定道行走。

(4)传统耕作:小麦收获后玉米免耕播种。玉米收获后,秸秆粉碎。旋耕作业,深度为10 cm。小麦播种行距为19 cm。作业时,拖拉机、播种机和小麦收获机在田间非固定道行走。

布置试验区前,试验地进行翻耕作业,深度为20 cm;然后进行了旋耕作业,深度为10 cm。2005年小麦播种时,固定道处理拖拉机按规划好的路线行走,其轨迹即为固定道。后续作业拖拉机均沿此固定道行走;非固定道作业时,机具在田间无固定道行走。

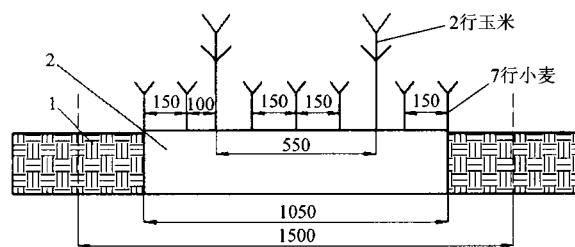


图1 固定道及作物布置示意图

Fig.1 Wheel track and crop arrangement

1. 固定道 2. 作物生长带

1.3 试验测试方法

冬小麦10月播种和夏玉米6月底深松、播种期测定方法:使用CTM2002B型农机综合测试仪测试(图2)。

深松作业时,深松机幅宽1.4 m,质量120 kg,配套拖拉机为TN654型,深松作业深度为30 cm。分别测量不同作业在空行(纯行走)和负载作业状态下的油耗。测试时,作业尽量保持匀速直线行驶。每次测试有效作业距离不少于80 m,每20~40 m记录一次平均作业数据,每种作业处理测试6次。

播种作业时,播种机为2BMF-2/7型固定道小

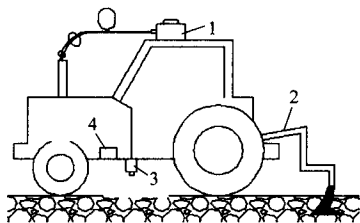


图 2 拖拉机悬挂农具油耗测量装置示意图
Fig. 2 Fuel consumption test of agricultural machine
1. 烟度计 2. 农具 3. 速度传感器 4. 油耗仪

麦/玉米通用免耕播种机,工作幅宽 1.5 m,质量为 400 kg,配套拖拉机为 TN654 型,播种深度控制在 4~5 cm,施肥深度控制在 9~10 cm。分别测量不同作业在空行(纯行走)和负载作业状态下的油耗。测试时,作业尽量保持匀速直线行驶。每次测试有效作业距离不少于 80 m,每 20~40 m 记录一次平均作业数据,每种作业处理测试 6 次。

CTM2002B 型农机综合测试仪测得的拖拉机油耗数据为小时耗油量和百公里耗油量。为了便于对比分析,折算成公顷油耗,取其平均值。

按照小时耗油量计算的公顷油耗为

$$F_{ca} = \frac{F_{ch}}{A} = \frac{10000F_{ch}}{1000vB} = \frac{10F_{ch}}{1.5v}$$

式中 F_{ca} ——公顷油耗, L/hm²

F_{ch} ——小时油耗, L/h

B ——作业幅宽,根据所设计的固定道系统,作业幅宽为 1.5 m

A ——作业面积, m²
 v ——作业速度, km/h
按照百公里油耗量计算的公顷油耗为

$$F_{ca} = \frac{F_{c100}}{A} = \frac{10\,000F_{c100}}{100\,000B} = \frac{F_{c100}}{15}$$

式中 F_{c100} ——百公里油耗, L/(100 km)

因此,公顷燃油消耗量为

$$F_{ca} = \frac{\frac{10F_{ch}}{1.5v} + \frac{F_{c100}}{15}}{2} = \frac{10F_{ch}}{3v} + \frac{F_{c100}}{30}$$

2 结果与分析

2.1 夏玉米机器作业油耗

夏玉米作业期间主要为固定道深松作业和玉米播种作业。深松作业需要耗费大量的能量,不需要年年深松。因此,只在 2006 年夏季进行了深松作业。

2.1.1 深松油耗

表 2 为不同耕作下深松作业油耗数据。相对于非固定道保护性耕作,固定道保护性耕作明显降低深松油耗($P=0.05$)。固定道保护性耕作油耗比非固定道降低 23.7%。其中,固定道保护性耕作纯行走油耗比非固定道降低 23.8%;固定道保护性耕作深松纯作业油耗为 3.98 L/hm²,非固定道保护性耕作为 6.25 L/hm²,固定道保护性耕作比非固定道保护性耕作油耗降低 36.3%。

表 2 2006 年 6 月深松油耗

Tab. 2 Fuel consumption of subsoiling in 2006

工作状态	处理	速度 /km·h ⁻¹	百公里油耗 /L·(100 km) ⁻¹	小时油耗 /L·h ⁻¹	公顷油耗 /L·hm ⁻²
空行	固定道	2.26 ^a	111.59 ^a	2.38 ^a	7.20 ^a
	非固定道	2.25 ^a	122.96 ^b	2.90 ^b	8.40 ^b
	总标准偏差	0.04	18.52	0.42	1.34
	总标准误差	0.01	5.23	0.22	0.35
作业	固定道	2.20 ^a	167.53 ^a	3.69 ^a	11.18 ^a
	非固定道	2.17 ^a	220.19 ^b	4.75 ^b	14.65 ^b
	总标准偏差	0.06	28.49	0.57	1.89
	总标准误差	0.02	8.22	0.17	0.55

注:表中同一工作状态同一列内右上角标有相同字母表示不同处理之间不存在显著差异($P=0.05$),下同。

2.1.2 夏玉米播种油耗

(1)2006 年

表 3 为不同耕作下 2006 年夏玉米播种油耗。2006 年玉米播种时,固定道深松播种和固定道免耕播种油耗明显低于非固定道播种($P=0.05$)。其中,固定道深松播种比非固定道播种油耗减少 3.64 L/hm²,固定道免耕播种比非固定道播种减少油耗 3.52 L/hm²。固定道保护性耕作平均播种油耗为 8.74 L/hm²,比非固定道保护性耕作减小 29.1%。固定道深松播种和固

定道免耕播种两种播种油耗没有明显差异。

(2)2007 年

表 4 为不同耕作处理下 2007 年夏玉米播种油耗。根据北京地区种植特点,且深松动力消耗大,一般采用隔年深松的方式,因此 2007 年玉米播种时,未进行固定道深松。

固定道油耗明显低于非固定道($P=0.05$)。固定道免耕地和固定道深松地播种的平均油耗为 5.775 L/hm²;非固定道免耕地和传统耕作地播种的

平均油耗为 6.755 L/hm²。固定道比非固定道减少油耗 14.5%。

地播种油耗分别降低 10.2% 和 11.9% ;相对于非固定道免耕地,固定道免耕地和固定道深松地播种油耗分别降低 17.0% 和 18.5% 。

相对于传统耕作,固定道免耕地和固定道深松

表 3 2006 年 6 月夏玉米播种油耗

Tab.3 Fuel consumption of maize planting in 2006

处理	速度 /km·h ⁻¹	百公里油耗 /L·(100 km) ⁻¹	小时油耗 /L·h ⁻¹	公顷油耗 /L·hm ⁻²
固定道免耕播种	5.04 ^a	134.24 ^a	6.80 ^a	8.80 ^a
固定道深松播种	5.02 ^a	129.51 ^a	6.56 ^a	8.68 ^a
非固定道播种	5.25 ^a	184.89 ^b	9.71 ^b	12.32 ^b
总标准偏差	0.35	26.79	1.71	1.84
总标准误差	0.08	6.31	0.40	0.43

表 4 2007 年 6 月夏玉米播种油耗

Tab.4 Fuel consumption of maize planting in 2007

处理	速度 /km·h ⁻¹	百公里油耗 /L·(100 km) ⁻¹	小时油耗 /L·h ⁻¹	公顷油耗 /L·hm ⁻²
固定道免耕播种	6.63 ^a	86.95 ^a	5.78 ^a	5.83 ^a
固定道深松播种	6.68 ^a	85.57 ^a	5.74 ^a	5.72 ^a
非固定道免耕播种	6.20 ^a	104.91 ^b	6.33 ^b	7.02 ^b
传统耕作播种	6.17 ^a	96.92 ^a	5.94 ^{ab}	6.49 ^{ab}
总标准偏差	0.86	16.53	0.62	1.11
总标准误差	0.18	3.37	0.13	0.23

综合 2006 年和 2007 年夏玉米的油耗数据,固定道保护性耕作和非固定道保护性耕作夏玉米播种平均油耗分别为 7.26 和 9.54 L/hm²。固定道保护性耕作平均减少播种油耗 23.9%。

2.2 冬小麦机器作业油耗

保护性耕作作业系统下,冬小麦作业期间主要的机具作业为冬小麦免耕播种,因此重点对比分析了固定道与非固定道系统的免耕播种油耗。

2.2.1 2006 年冬小麦免耕播种油耗

表 5 为 2006 年 10 月冬小麦播种时不同处理行

走和作业的油耗。相对于非固定道保护性耕作,固定道保护性耕作显著降低作业总油耗($P=0.05$)。固定道保护性耕作平均减少油耗 30.1%。其中,固定道免耕处理和固定道深松处理分别降低油耗 27.8% 和 32.4%。

固定道降低油耗主要来自两方面。一方面是降低行走油耗。固定道保护性耕作明显降低行走油耗($P=0.05$)。固定道免耕处理和固定道深松处理纯行走油耗均比非固定道降低 15.4%。

表 5 2006 年 10 月冬小麦播种油耗

Tab.5 Fuel consumption of winter wheat planting in 2006

工作状态	处理	速度 /km·h ⁻¹	百公里油耗 /L·(100 km) ⁻¹	小时油耗 /L·h ⁻¹	公顷油耗 /L·hm ⁻²
空行	固定道免耕	2.14 ^a	252.97 ^a	5.56 ^a	17.12 ^a
	固定道深松	2.14 ^a	252.97 ^a	5.56 ^a	17.12 ^a
	非固定道	2.10 ^a	302.25 ^b	6.42 ^b	20.24 ^b
	总标准偏差	0.09	76.53	1.32	4.33
	总标准误差	0.02	20.33	0.42	1.21
作业	固定道免耕播种	2.12 ^a	407.47 ^a	8.87 ^a	27.59 ^a
	固定道深松播种	2.11 ^a	382.58 ^a	8.27 ^a	25.82 ^a
	非固定道播种	2.08 ^a	566.05 ^b	12.05 ^b	38.21 ^b
	总标准偏差	0.12	92.82	1.78	6.14
	总标准误差	0.03	26.8	0.51	1.76

另一方面是降低机具工作油耗。固定道免耕播种、固定道深松播种和非固定道播种机具纯工作油耗分别为 10.47、8.70 和 17.97 L/hm²。相对于非固定道播种,固定道免耕和固定道深松播种具纯工作油耗分别降低 41.2% 和 51.6%。

2.2.2 2007 年冬小麦播种油耗

表 6 为 2007 年 10 月小麦播种时不同处理作业油耗。固定道免耕播种和固定道深松播种冬小麦播种油耗明显低于非固定道免耕播种和传统耕作 ($P=0.05$)。两种固定道播种和两种非固定道播种

平均油耗分别为 20.92 和 26.12 L/hm²。相对于非固定道,固定道减小冬小麦播种油耗 19.9%。

两种固定道播种中,固定道深松播种耗油量比固定道免耕播种降低 5.8%,但是差异不明显。表明深松作业的松土的效果在两年后逐渐降低。

两种非固定道播种中,非固定道免耕播种播种油耗比传统耕作仅减少 0.9%。虽然旋耕作业可以疏松土壤,但作业后的土壤在播种时更容易被压实,更多的能量用于对土壤的压实作功和疏松被拖拉机再次压实的土壤。

表 6 2007 年 10 月冬小麦播种油耗
Tab.6 Fuel consumption of winter wheat planting in 2007

处理	速度	百公里油耗	小时油耗	公顷油耗
	/km·h ⁻¹	/L·(100 km) ⁻¹	/L·h ⁻¹	/L·hm ⁻²
固定道免耕播种	3.80 ^a	310.69 ^a	12.72 ^a	21.54 ^a
固定道深松播种	3.99 ^a	284.67 ^a	12.86 ^a	20.30 ^a
非固定道免耕播种	3.35 ^a	378.67 ^b	13.39 ^b	26.00 ^b
传统耕作播种	3.37 ^a	388.53 ^b	13.38 ^b	26.23 ^b
总标准偏差	0.36	54.90	0.47	2.97
总标准误差	0.07	11.21	0.10	0.61

综合两年冬小麦播种,固定道免耕播种、固定道深松播种、非固定道免耕播种和传统耕作冬小麦播种平均油耗为 24.57、23.06、32.11 和 32.22 L/hm²。相对于传统耕作,固定道免耕播种和固定道深松播种分别降低冬小麦播种油耗 23.7% 和 28.4%;相对于非固定道免耕播种,固定道免耕播种和固定道深松播种分别降低冬小麦播种油耗 23.5% 和 28.2%。

固定道冬小麦播种平均油耗为 23.81 L/hm²;非固定道冬小麦播种平均油耗为 32.16 L/hm²。相对于非固定道,固定道减小冬小麦播种油耗 26.0%。

2.3 两年作业周期总油耗

同时,测定了 2006 年传统耕作的旋耕作业油

耗。综合 2006、2007 两年耕作和播种作业的油耗,可以得出表 7 所示的总油耗。4 种处理中,传统耕作总油耗最高,固定道免耕总油耗最小。相当于传统耕作,固定道免耕和固定道深松总油耗分别降低 39.9% 和 32.4%;尽管固定道深松进行了油耗较大的深松处理,其总油耗分别比传统耕作和非固定道免耕作业降低 32.4% 和 14.2%。

固定道作业中,深松虽然可以疏松土壤,改善土壤的蓄水能力,但是由于深松作业能耗大,且固定道深松下玉米和小麦播种节能效果小,因而其油耗明显高于免耕 ($P=0.05$)。相对于固定道免耕,固定道深松总油耗增加 7.94 L/hm²。

表 7 不同耕作体系两年作业油耗
Tab.7 Total operation fuel consumption of for different treatments in two years L/hm²

处理	2006 年				2007 年				总油耗
	深松	玉米播种	旋耕	小麦播种	深松	玉米播种	旋耕	小麦播种	
固定道免耕		8.80		27.59	5.83			21.54	63.76 ^a
固定道深松	11.18	8.68		25.82	5.72			20.30	71.70 ^b
非固定道免耕		12.32		38.21	7.02			26.00	83.55 ^c
传统耕作		12.32	11.42	38.21	6.49		11.42	26.23	106.09 ^d

非固定道作业中,非固定道免耕总油耗明显低于传统耕作 ($P=0.05$)。相对于传统耕作,非固定道免耕总油耗降低 21.2%。油耗的降低主要是由于非固定道免耕比传统耕作少两次油耗较大的旋耕

作业。同时旋耕后的土壤更易再压实,从而增加行走能耗和农具作业能耗。试验结果表明,现有的非固定道免耕作业相对于传统油耗同样可以减少燃油消耗,从而降低作业成本。

综合两年的油耗试验数据,固定道保护性耕作平均比非固定道保护性耕作减少燃油消耗 27.09 L/hm^2 ,节油率为 28.6% ,从而降低作业成本。按当年0号柴油市场价格 5.0 元/L 计,固定道保护性耕作可以减少成本 135 元/hm^2 。相对于传统耕作,固定道免耕、固定道深松和非固定道免耕分别减少成本 212 、 172 和 113 元/hm^2 。相对于非固定道免耕,固定道免耕和固定道深松分别减少成本 99 和 59 元/hm^2 。

固定道保护性耕作节约能耗主要来源于两方面。一是机具行走节能。固定道保护性耕作设置专门的机具行走道,为机具行走提供紧实的路面,减少了滚动阻力,降低机具行走油耗,同时减少机具对土壤压实的做功;二是农具工作部件的节能。固定道保护性耕作避免了对作物生长带的压实,改善了作物生长区的土壤结构,从而降低机具的工作阻力,减少耕作部件作业能耗^[12]。

固定道保护性耕作兼顾了轮胎行走和农具作业两方面需求,控制田间压实,降低滚动阻力和机具工作阻力,从而提高了机具的牵引性能。由于机具田间作业能耗和总牵引阻力存在着强正相关关系^[13],因此固定道保护性耕作通过降低机具牵引阻力^[12],可以显著降低燃油消耗。

在华北一年两熟地区,保护性耕作技术条件下,

机具每年进地次数为 $4\sim 6$ 次,压实面积为 $40\%\sim 60\%$,如果不控制轮胎造成的压实,逐年累计压实面积将覆盖整个作物区,加剧土壤结构的破坏,加大后续作业动力消耗。在依据TN654型拖拉机设计的固定道保护性耕作系统下,压实面积控制在 30% 的固定区域内,轮胎只在紧实的行走带上行走,减少了额外的轮胎压实能耗,同时避免对生长带的压实,减少作业能耗,从而节省了拖拉机动力和燃油消耗。

3 结论

(1)固定道保护性耕作通过区分机具行走道和作物生长带,改善机具行走性能,减少机具对作物生长带的压实,明显降低机具作业的作业能耗。两年试验期,固定道保护性耕作平均比非固定道保护性耕作减少燃油消耗 27.09 L/hm^2 ,节油率为 28.6% 。

(2)固定道保护性耕作深松作业比非固定道保护性耕作油耗降低 23.7% 。其中,纯行走油耗降低 23.8% ,纯作业油耗降低 36.3% 。

(3)固定道保护性耕作夏玉米播种作业平均比非固定道保护性耕作减少油耗 23.9% 。

(4)固定道保护性耕作冬小麦播种作业平均比非固定道保护性耕作减少油耗 26.0% 。

参 考 文 献

- 1 陈浩. 北京一年两熟区固定道保护性耕作技术和配套免耕播种机研究[D]. 北京:中国农业大学,2008.
Chen Hao. Study on controlled traffic conservation tillage and matched no-till planter in annual two crops region of Beijing [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 2 Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(2): 121 ~ 145.
- 3 Tullberg J N. Wheel traffic effects on tillage draught [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(3): 375 ~ 382.
- 4 Chamen W C T. New methodology for weed control and crop production: controlled traffic, precision guidance and direct seeding [C]//Proceedings of the Fourth European Weed Research Society Workshop on Physical Weed Control, Elspeet, The Netherlands, 2000.
- 5 Tullberg J N. Controlled traffic in Australia [C]//Proceedings of National Controlled Traffic Conference. Gatton: Queensland University Gatton College, 1995: 7 ~ 11.
- 6 杜兵,周兴祥. 节约能耗的固定道耕作法[J]. 中国农业大学学报,1999,4(2):63 ~ 66.
Du Bing, Zhou Xingxiang. Energy saving of controlled traffic tillage [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(2):63 ~ 66. (in Chinese)
- 7 李洪文,高焕文,陈君达,等. 固定道保护性耕作的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(4):73 ~ 77.
Li Hongwen, Gao Huanwen, Chen Junda, et al. Study on controlled traffic with conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4):73 ~ 77. (in Chinese)
- 8 Chen Hao, Bai Yuhua, Wang Qingjie, et al. Traffic and tillage effects in wheat production on the Loess Plateau of China: 1. crop yield and SOM [J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46(8):645 ~ 651.
- 9 高焕文,李洪文,李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报,2008,39(9):43 ~ 48.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenying. Development of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):43 ~ 48. (in Chinese)

(下转第60页)

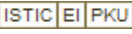
- distribution in field conditions[J]. Crop Protection, 2003, 22(6):813~820.
- 7 Lebeau F, Bahir L E, Destain M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(2):149~161.
 - 8 Speelman L, Jansen J W. The effect of spray-boom movement on the liquid distribution of field crop sprayers[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1974, 19(2):117~129.
 - 9 Kennes P, Ramon H, Baerdemaeker J D. Modelling the effect of passive vertical suspensions on the dynamic behaviour of sprayer booms[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(3):217~229.
 - 10 张际先. 喷雾机悬架的优化设计[J]. 农业机械学报, 1995, 26(1):50~55.
Zhang Jixian. Optimal design of boom sprayer suspensions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(1):50~55. (in Chinese)
 - 11 张际先. 喷雾机喷臂悬架性能的动态分析[J]. 农业机械学报, 1996, 27(增刊):134~138.
Zhang Jixian. Dynamic analysis of the suspension performance of sprayer boom[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(Supp.):134~138. (in Chinese)
 - 12 Ramon H. A design procedure for modern control algorithms on agricultural machinery applied to active vibration control of a spray boom[D]. Belgium: K U Leuven, 1993.
 - 13 Jeon H Y, Womac A R, Wilkerson J B, et al. Sprayer boom instrumentation for field use[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3):659~666.
 - 14 Ooms D, Lebeau F, Ruter R, et al. Measurements of the horizontal sprayer boom movements by sensor data fusion[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 33(2):139~162.
 - 15 O'Sullivan J A. Verification of passive and active versions of a mathematical model of a pendulum spray boom suspension [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1988, 40(2):89~101.
 - 16 Pochi D, Vannucci D. Laboratory evaluation of linear and angular potentiometers for measuring spray boom movements[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(2):153~161.
 - 17 Pochi D, Vannucci D. A system with potentiometric transducers to record spray boom movements under operating conditions [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(4):393~406.
 - 18 Franklin G F, Powell J D, Emami-Naeini A. Feedback control of dynamic systems [M]. Upper Saddle River, NJ: PrenticeHall, 2002.
 - 19 JB/T 9805.1—1999 喷杆式喷雾机 技术条件[S]. 1999.
JB/T 9805.1—1999 Technical requirements for boom sprayer[S]. 1999. (in Chinese)
 - 20 Ljung L. System identification-theory for the user second edition[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2002.
 - 21 Chen Hanfu. New approach to recursive identification for ARMAX systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(4):868~879.
 - 22 甘仞初. 动态数据的统计分析[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1991.
 - 23 Ola H. On the coefficient of determination for mixed regression models[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2008, 138(10):3 022~3 038.

(上接第42页)

- 10 李汝莘, 史岩, 迟淑筠. 机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗[J]. 农业机械学报, 1999, 30(2):12~16.
Li Ruxin, Shi Yan, Chi Shujun. Soil compaction and energy consumption caused by tires of agricultural machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2):12~16. (in Chinese)
- 11 陈浩, 黄虎, 杨亚莉, 等. 固定道对行小麦/玉米通用免耕播种机设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):72~76.
Chen Hao, Huang Hu, Yang Yali, et al. Design of row-followed no-till wheat and maize planter under controlled traffic farming system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):72~76. (in Chinese)
- 12 陈浩, 吴伟蔚, 刘新田, 等. 轮胎压实对机具作业阻力的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2):52~57.
Chen Hao, Wu Weiwei, Liu Xintian, et al. Effect of wheel traffic on working resistance of agricultural machinery in field operation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):52~57. (in Chinese)
- 13 黄虎, 王晓燕, 李洪文, 等. 固定道保护性耕作节能效果试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12):140~143.
Huang Hu, Wang Xiaoyan, Li Hongwen, et al. Experimental investigation on energy saving of controlled traffic conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2007, 23(12):140~143. (in Chinese)

作者：[陈浩](#)，[杨亚莉](#)，[何进](#)，[王庆杰](#)，[李洪文](#)，[Chen Hao](#)，[Yang Yali](#)，[He Jin](#)，[Wang Qingjie](#)，[Li Hongwen](#)

作者单位：[陈浩, 杨亚莉, Chen Hao, Yang Yali \(上海工程技术大学汽车工程学院, 上海, 201620\)](#)，[何进, 王庆杰, 李洪文, He Jin, Wang Qingjie, Li Hongwen \(中国农业大学工学院, 北京, 100083\)](#)

刊名：[农业机械学报](#) 

英文刊名：[Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery](#)

年，卷(期)：2012, 43(2)

被引用次数：1次

参考文献(13条)

1. [陈浩](#) [北京一年两熟区固定道保护性耕作技术和配套免耕播种机研究](#) 2008
2. [Hamza M A;Anderson W K](#) [Soil compaction in cropping systems:a review of the nature,causes and possible solutions](#) 2005 (02)
3. [Tullberg J N](#) [Wheel traffic effects on tillage draught](#) 2000 (03)
4. [Chamen W C T](#) [New methodology for weed control and crop production:controlled traffic,precision guidance and direct seeding](#) 2000
5. [Tullberg J N](#) [Controlled traffic in Australia](#) 1995
6. [杜兵;周兴祥](#) [节约能耗的固定道耕作法\[期刊论文\]-中国农业大学学报](#) 1999 (02)
7. [李洪文;高焕文;陈君达](#) [固定道保护性耕作的试验研究\[期刊论文\]-农业工程学报](#) 2000 (04)
8. [Chen Hao;Bai Yuhua;Wang Qingjie](#) [Traffic and tillage effects in wheat production on the Loess Plateau of China:1. crop yield and SOM](#) 2008 (08)
9. [高焕文;李洪文;李问盈](#) [保护性耕作的发展\[期刊论文\]-农业机械学报](#) 2008 (09)
10. [李汝莘;史岩;迟淑筠](#) [机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗\[期刊论文\]-农业机械学报](#) 1999 (02)
11. [陈浩;黄虎;杨亚莉](#) [固定道对行小麦/玉米通用免耕播种机设计\[期刊论文\]-农业机械学报](#) 2009 (03)
12. [陈浩;吴伟蔚;刘新田](#) [轮胎压实对机具作业阻力的影响](#) 2010 (02)
13. [黄虎;王晓燕;李洪文](#) [固定道保护性耕作节能效果试验研究\[期刊论文\]-农业工程学报](#) 2007 (12)

引证文献(1条)

1. [韦鹏飞](#), [陈浩](#), [王良杰](#), [陈海宁](#) [轮胎—土壤相互作用研究综述\[期刊论文\]-农机化研究](#) 2013 (9)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_nyjxxb201202008.aspx