

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.007

一年两熟地区保护性耕作深松试验

何明¹ 高焕文² 董培岩¹ 崔德杰³ 赵文阁¹

(1. 青岛市农业机械管理局, 青岛 266021; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 青岛农业大学农学院, 青岛 266109)

摘要: 为深入了解深松对产量的影响,2013—2017年连续5年进行了深松试验,初步证明小麦玉米一年两熟区,采用保护性耕作免耕后,实施深松能取得明显增产效果。夏深松的效果优于秋深松,5年平均值夏深松比不深松增产5.9%,比秋深松增产2.3%,同时作业费用较低,大面积应用有利农户增产增收。但在夏季干旱严重又缺乏灌溉条件的地区,仍需采用秋深松。深松对作业当季产量影响最大,试验的8季收获中6季为当季产量最高。连续多年深松存在明显的增产效应递减现象,夏深松第1年增产18%,此后逐年降为6.3%、3.9%、3.4%、1.7%。增产效应递减反映出深松对产量影响的两面性:既有疏松土壤、增加田间持水量等正面影响,也有降低播种质量、迟缓土壤有机质积累、减少土壤细菌数量等负面影响,负面影响逐年增大,深松增产效应逐步下降。当增产幅度低于2%时,深松将增产不增收。从本试验看,夏深松第5年、秋深松第3年增产幅度降至投入大于产出的拐点。合理的深松周期需因地制宜,尚需通过进一步试验来确定。

关键词: 保护性耕作; 一年两熟地区; 田间试验; 夏深松; 秋深松

中图分类号: S233.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0058-06

Sub-soiling Experiment on Double Cropping and Conservation Tillage Adopted Area

HE Ming¹ GAO Huanwen² DONG Peiyan¹ CUI Dejie³ ZHAO Wenge¹

(1. Qingdao Farm Machinery Management Bureau, Qingdao 266021, China

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

3. College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: From the sub-soiling experiment during five years (2013—2017), it is preliminarily approved that the yield was obviously increased by sub-soiling applied in the continual no-tillage field. The highest yield related with sub-soiling would be happened at current season of operation, searching totally eight harvest seasons, and six seasons had the highest yield at current season of sub-soiling. Adoption of sub-soiling in summer had 5.9% higher yield than no sub-soiling, and 2.3% higher than in autumn, besides, summer sub-soiling had better power using efficiency and lower operation cost. Therefore, summer sub-soiling had better prospect on extension, but the autumn sub-soiling would be preferentially adopted in drought summer and poor irrigation area. An outstanding event in the trial was the decline of yield increasing rate, for summer sub-soiling, the first year had 18% of yield increase, since then, the yield increasing rate was quickly declined to 6.3%, 3.9%, 3.4% and 1.7% in the second, third, fourth and fifth year. The decline of yield increase rate reflected double aspects of sub-soiling influence. It had positive aspect by loosening soil and holding more water in the field, but also had negative aspect by depressing of sowing quality, reducing of soil organic matter content and soil bacteria. The negative influence would be accumulated year by year, thus yield increase rate was gradually declined. Sub-soiling was an energy consuming operation, from roughly calculation, while yield increase rate was lower than 2% around, adoption of sub-soiling became input larger than output. From the yield decline trend in the trial, at fifth year of continued summer sub-soiling, at third year of continued autumn sub-soiling, the

收稿日期: 2017-11-09 修回日期: 2017-12-14

基金项目: 农业部保护性耕作试验监测基地建设项目(2013—2016年)

作者简介: 何明(1963—),男,高级工程师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: qdsbgb@163.com

通信作者: 高焕文(1939—),男,教授,主要从事农业机械化和保护性耕作研究,E-mail: ghwbgs@126.com

yield increase rate would reach the turnoff point. To reasonably determine the period of sub-soiling, further experiment was necessary.

Key words: conservation tillage; double-cropping area; field experiment; summer sub-soiling; autumn sub-soiling

0 引言

我国小麦玉米一年两熟地区保护性耕作从 2003 年开始推广应用,大量保护性耕作土地连续多年免耕,耕层土壤容重增大,对出苗和作物产量产生了不同程度的影响,逐步显现出对深松的迫切需求。2011 年国家开始对深松作业实施补贴,进一步调动了农户的积极性,深松作业在一年两熟地区大规模推广应用。

国内近年来对深松的试验研究集中在深松机具的设计、研制、试验^[1-4],降低深松阻力的试验研究方面^[5-9],对提高深松机具性能、增加深松机具种类、减少深松阻力消耗等起到了重要作用。在深松对土壤、环境、作物产量和经济效益的影响方面,国内外开展了大量试验研究^[10-18],进一步明确了深松有助于改善土壤耕层结构,提高土壤蓄水能力,增加作物产量。文献[19]讨论了我国北方一年一熟旱作区,多年免耕体系中引入周期性深松(2 年 1 深松,3 年 1 深松)的效果,指出深松降低土壤容重、增大孔隙度、增加团粒结构、提高产量,但土壤有机质和全氮含量有所降低。文献[20]介绍了加拿大一项长期轮耕和轮作结合的试验,结果发现持续免耕土壤结构变差,轮耕(免耕与翻耕)和轮作(单一玉米、玉米-大豆、玉米-燕麦-大麦)均能显著改善土壤结构。文献[21]讨论了美国中西部玉米带,Chisel Plow(近似我国深松)对免耕作物产量的影响,指出在单一玉米连作或干旱情况下,Chisel Plow 相比免耕有增产效果,但对玉米-大豆轮作地效果不大,单一大豆种植地则更无耕作必要。

总体看国内外对一年一熟区持续免耕情况下土壤性状、产量的变化以及引进深松等耕作措施的影响进行了较多试验研究,取得了一批重要成果。但是针对一年两熟地区持续免耕体系中采用深松的问题,试验研究偏少。一些现实问题,如小麦玉米一年两熟地区,免耕体系中采用深松对土壤和产量的影响是什么,效果如何;是应夏季还是秋季进行深松;由于深松补贴,部分地区年年深松,对此尚未见有关的试验报道,一直存在争议。因此,从 2013 年开始,在一年两熟保护性耕作高产高效体系试验中^[22],设置了新的深松试验区,针对上述问题开展专项试验,指导深松的合理应用,丰富保护性耕作高产高效技

术体系。

1 试验条件、材料与方法

1.1 试验条件

试验设在山东省平度市兰底镇桑园村,属于温带季风气候,地势平坦,土壤质地为潮土,种植制度为小麦、玉米平作一年两熟,是山东、河南、河北等地区典型的种植制度,地下水贫瘠、依靠池塘蓄雨灌溉。2013 年保护性耕作面积占本市小麦、玉米种植面积 30%,且逐年扩大。根据青岛农业大学测定,2012 年参试土壤 0~20 cm 平均有机质质量比为 15.10 g/kg,碱解氮质量比 81.74 mg/kg、速效磷质量比 20.4 mg/kg、速效钾质量比 124 mg/kg,pH 值 5.56。试验地土壤肥力基本均匀,肥力水平 3~4 级。由于多年保护性耕作的影响,参试土壤有机质、速效磷、速效钾含量高于当地传统耕地,但碱解氮含量和 pH 值低于传统耕地,在当地保护性耕作土壤中具有代表性。

1.2 试验机具

按传统农业试验的观念,夏深松和秋深松的对比试验应选用相同的机具,便于比较时排除机具因素的影响。如果在实际生产中两个季节可以使用相同机具,像北方一年一熟地区,上述做法是可行合理的。但是,在一年两熟地区生产中,夏季和秋季基本采用不同的深松机具。夏季多采用玉米深松播种联合作业机(图 1),而该机不可能用于秋季播小麦。秋季本地区可以独立深松,也可以和播种联合作业。深松与小麦播种联合作业的机具(图 2),由于播种机构不同,同样难以在夏季使用。独立深松机具是可以在夏季作业的,但从夏季抢农时、减少跑墒,以及减少机具进地次数的角度,联合作业比独立深松具有明显优势。农户不可能为利用一个深松机而放弃联合作业。因此,机械化农业试验的观念应该是夏深松和秋深松各自选用最合适的机具,这样既比较了不同时间季节,也比较了不同的机具,才是更全面、合理的,试验结果可以迅速推广应用。

夏深松选用河北农哈哈 2BSQPY-4 型玉米深松播种联合作业机(图 1),工作幅宽 2.4 m,拖拉机配套动力 51 kW 以上。

秋深松选用山东大华 4 铲式深松机(图 3)和河南豪丰 2BMFS-12/6 型小麦免耕播种机(图 4)。

小麦是密植作物,播种耗用功率大,深松播种联合作业需要大功率拖拉机,如山东大华 2BMSFS-12/6 型小麦深松播种联合作业机(图 2),作业幅宽 2.4 m,需要 88 kW 以上拖拉机。本地区农田地块不大,大功率拖拉机利用率很低,势必提高深松作业成本。因此,试验选取独立深松机。



图 1 河北农哈哈 2BSQPY-4 型玉米深松播种机
Fig. 1 2BSQPY-4 corn no-till planter with sub-soiling by Nonghaha of Hebei



图 2 山东大华 2BMSFS-12/6 型小麦深松播种机
Fig. 2 2BMSFS-12/6 wheat no-till drill with sub-soiling by Dahua of Shandong



图 3 山东大华 4 铲式深松机
Fig. 3 Four shovels sub-soiler by Dahua of Shandong



图 4 河南豪丰 2BMFS-12/6 型小麦免耕播种机
Fig. 4 2BMFS-12/6 wheat no-till drill by Haofeng of Henan

1.3 试验区设计

深松单因素、3 水平、3 次重复,共 9 个小区。为适应机械作业,试验小区长 70 m、宽 4.8 m,小区间隔离带 1 m,重复间隔离带 10 m。传统对照 3 个小区,

总计 12 个小区,占地 5 400 m² 左右。试区布置如图 5。图中:D1 表示夏深松(播种玉米时深松),行间深松、弯柱式楔形铲、铲间距 60 cm、松土深度 30 cm,秋季不深松;D2 表示秋深松(播种小麦前深松),全面深松、倒梯形弧面铲、铲间距 60 cm、松土深度 30 cm,夏季不深松;D3 表示不深松,全年免耕;CK 表示传统耕作对照。

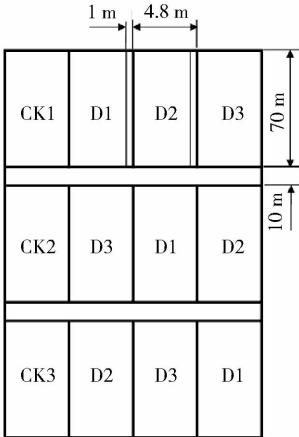


图 5 深松试验区布置
Fig. 5 Arrangement of sub-soiling experiment plots

1.4 试验区管理

试验地小麦、玉米生产作业工艺为:玉米机械收获—秸秆全部粉碎覆盖—秋深松(或不深松)—小麦免耕施肥播种—灌水—田间管理;小麦机械收获—秸秆全部粉碎覆盖—夏深松与玉米施肥播种联合作业(或玉米施肥播种作业)—灌水—田间管理。播小麦施硫酸钾复合肥 750 kg/hm²,播玉米施海藻复混肥 750 kg/hm²,小麦灌越冬水(450 m³/hm²) 1 次,返青水(375 m³/hm²) 1 次,玉米正常年份不灌水。

除深松作业外,各试验小区其它作业和管理措施相同。传统对照处理为收获后人工抱走秸秆、根茬还田,旋耕整地两遍,传统播种。

1.5 田间测试方法

1.5.1 测产

小麦测产:每小区 3 点随机取样,测定产量三要素,每个样点取 11 行测定行距,2 m 距离测定有效穗数,同时随机取 50 头穗带回实验室脱粒干燥后,测定穗粒数、千粒质量。玉米测产:每小区 3 点随机取样,测定行距,每行测定 10 m 玉米株数用于计算株距,其中随机选取 10 株带回实验室干燥测定穗粒数和千粒质量。

1.5.2 测土

取样:每小区 3 点随机取样,0~20 cm 表层土壤混合样品。土壤含水量采用干燥法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤孔隙度采用计算法测定;土壤有机质

含量采用重铬酸钾容重法测定；土壤细菌数量采用平板培养菌落计数法测定。

2 试验结果

2.1 产量

试验区每季的产量,经过方差检验(*F* 检验)

确认不同处理间具有显著差异($P < 0.05$)或差异($P < 0.10$)后,取每一处理 3 个小区的平均产量作为该处理产量,结果如表 1。3 种深松处理(D1、D2、D3)、1 种传统耕作处理(CK),2013 年 6 月—2017 年 6 月共 8 个季节的产量及对比如表 1 所示。

表 1 深松试验区小麦、玉米产量对比(2013—2017 年)
Tab.1 Wheat and corn yields in sub-soiling plots from 2013 to 2017

处理	2013	2014		2015		2016		2017	5 年 8 季
	玉米	小麦	玉米	小麦	玉米	小麦	玉米	小麦	累计产量
D1	10.10 *	8.16	12.04	7.74	10.66 *	9.23	14.00 *	8.74	80.70
D2	8.58 **	8.21 *	12.43	7.95 *	10.40	9.76 *	12.86	8.70	78.89
D3	8.58	7.65	11.37	7.53	10.16	9.29	13.04	8.59	76.21
CK	7.56	7.07	10.10	6.77	9.95	6.85	10.68	6.72	65.70
D1/D3 季增产率/%	18	6.7	5.9	2.8	5.0	-0.7	7.4	1.7	
D1/D3 年增产率/%	18	6.3		3.9		3.4		1.7	
D2/D3 季增产率/%	0	7.3	9.3	5.6	2.4	5.1	-1.4	1.3	
D2/D3 年增产率/%	0	8.3		4.0		1.9		1.3	

注：* 表示深松当季产量最高的小区；**表示 2013 年 D2 小区没有深松,其玉米产量与不深松小区相同。

从表 1 可见,不深松(免耕)相比深松产量低,但相比传统耕作仍然是增产的,平均增产幅度达到 16%。考虑到免耕投入少、成本低,所以一年两作地区长期免耕虽然不是最佳选择,但当前仍是可行的。

从表 1 可见,5 年 8 次收获中有 6 次当季深松获得的产量最高,证明深松对当季产量影响最大。

从表 1 可见,深松实施的第 1 年,深松比不深松增产 18%。表明多年免耕的土壤,进行深松可取得显著增产效果。

从表 1 的 5 年累计产量看,由大到小依次为夏深松、秋深松、不深松,初步证明夏深松的增产效果优于秋深松。夏深松相比秋深松增 2.3%、比不深松增 5.9%。

从表 1 结果可见,每年深松有明显的增产效应递减现象。表 1 和图 6 显示,夏深松第 1 年比不深松增产 18%,随后增幅迅速递减。表 1 显示,秋深松第 1 年增产 8.3%,第 2 年降为 4.0%,第 3 年降为 1.9%。夏深松第 5 年、秋深松第 3 年增幅降到 2% 以下。

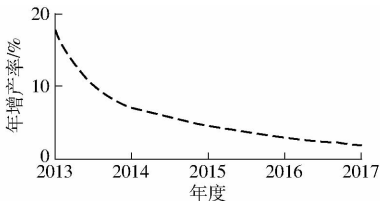


图 6 夏深松增产幅度变化曲线

Fig. 6 Reduction trend of yield increasing rate in summer sub-soiling compared to no sub-soiling

2.2 土壤容重、孔隙度、田间持水量、有机质含量及土壤细菌数量

2017 年土壤容重、孔隙度、田间持水量测定结果见表 2,测定时间为 2017 年 6 月 19 日,2014—2017 年土壤有机质含量测定结果见表 3,土壤细菌、真菌数量测试结果见表 4,测定时间为 2014 年 6 月 17 日。

表 2 试验区土壤容重、孔隙度及田间持水量
Tab.2 Soil bulk density, porosity and field water holding capacity of sub-soiling trial plots

处理	容重/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度/%	田间持水量/%
D1	1.08	59.36	26.50
D2	1.13	57.19	27.26
D3	1.15	56.45	24.05
CK	1.23	53.41	22.07

表 3 2014—2017 年深松试验区土壤有机质质量比
Tab.3 Organic matter contents during 2014—2017 at sub-soiling trial plots

处理	测定日期				4 年
	2014-04	2015-10	2016-06	2017-03	平均值
D1	13.61	16.78	17.53	19.35	16.82
D2	13.28	17.19	19.13	20.53	17.53
D3	13.65	16.99	20.22	20.36	17.81
CK	12.53	13.63	14.54	15.37	14.02

从表 2 可知,深松降低土壤容重、增加土壤孔隙度和田间持水量,从而有利于提高作物产量。夏深松比不深松降低土壤容重 6.1%、增加孔隙度 5.2%,提高田间持水量 10.2%。

表 4 不同深松处理的土壤细菌、真菌数量

Tab. 4 Number of soil bacteria and epiphyte at different sub-soiling trial plots

处理	土壤细菌数量				土壤真菌数量			
	测点 1	测点 2	测点 3	平均	测点 1	测点 2	测点 3	平均
D1	4.0×10^4	5.2×10^4	2.8×10^4	4.0×10^4	4.1×10^4	2.0×10^4	1.5×10^4	2.5×10^4
D2	8.3×10^4	2.2×10^4	4.7×10^4	5.1×10^4	2.1×10^4	3.0×10^4	2.7×10^4	2.6×10^4
D3	5.3×10^4	1.07×10^5	1.51×10^5	1.04×10^5	6.4×10^4	3.7×10^4	5.5×10^4	5.2×10^4

由表 3 可见,深松土壤有机质含量低于不深松,4 年平均夏深松土壤有机质含量比不深松低 5.6%,秋深松比不深松低 1.6%。

表 4 表明,深松处理的土壤细菌数量比不深松平均减少 50%,土壤细菌活力减少、土壤肥力降低。

3 结果分析与讨论

3.1 夏深松与秋深松效果分析

3.1.1 夏深松

(1)夏深松的优势为:深松后雨季到来,利于土壤蓄墒;作业地表为小麦秸秆覆盖,比玉米秸秆数量少、强度低,深松机堵塞少、易于保证作业质量;深松与播种联合作业时,玉米行距大,可以与深松行距一致,每行玉米都播在深松沟同一部位,土壤松软一致,保持播深稳定;玉米行数少、播种消耗功率小,加上深松,中型拖拉机仍然可以作业,动力利用好,作业成本低。如试验区夏深松费用 300 元/hm²,而秋深松费用 600 元/hm²。

(2)夏深松的劣势为:该时期土壤比较干旱,深松作业易产生土坷拉、跑墒,影响玉米出苗。对有灌水条件的地区,可以通过播后灌水保全苗。对于干旱严重,又缺乏灌溉条件的地区,采用夏深松风险较大。

(3)综合来看,夏深松增产效果好,获得增产的周期长,作业费用低,应该大规模推广应用。但在缺乏灌溉条件的地区,实施夏深松的年份不宜固定,干旱时应继续免耕,直至墒情较好的年份出现再进行深松。保护性耕作不要求年年深松,如 3 或 4 年深松 1 次,3 年出现 1 次合适墒情的概率还是很大的。严重干旱地区 3 年也难保证出现 1 年好墒情,应采用秋深松。

3.1.2 秋深松

(1)秋深松优点为:土壤墒情一般较好,可以保证松土质量;适合作业时间较长,可以独立深松。

(2)秋深松缺点:秋后雨季结束,深松的蓄水保墒作用有限,还可能因动土增加跑墒;玉米秸秆多、根茬壮,深松铲易被堵塞,影响深松作业效果;小麦对种床要求高,深松后播小麦,有两方面原因会影响出苗:土壤中有土坷拉、孔隙大,土壤松软不均,由于

小麦是密植作物、行距小,难以与深松行距匹配,小麦只能播在深松沟不同部位,土壤松软不一、导致播种深浅不一;小麦播种机行数多、负荷重,深松是在重负荷作业上再加重负荷,需要拖拉机功率更大。如山东大华生产的 2BMSFS-12/6 型小麦深松播种联合作业机,需要 88 kW 以上拖拉机,其它田间作业一般不需要这么大功率,造成拖拉机动力利用差,深松作业成本上升。

(3)综合来看,秋深松产量低于夏深松、作业费用较高,大面积应用夏深松更有利农户增产增收。但在干旱严重、灌溉条件缺乏的地区,玉米青贮、收获机压地严重应及时疏松的地区等,还是必须采用秋深松。

3.2 年年深松增产效应递减分析

出现增产效应递减,是因为深松对产量的影响有两面性。深松有利于增产,如疏松土壤、增加土壤孔隙度、提高土壤田间持水量(表 2)^[10-18];深松不利于增产,是因为深松后地表高低不平、土壤紧实度软硬不均、将影响播深均匀性,深松产生的土坷拉将不同程度地降低播种质量。从长期看,深松可能导致土壤有机质含量增长缓慢,细菌和真菌减少(表 3、4)^[19]。也有专家认为深松会加大肥料淋溶损失等。本期深松试验开始时,试验区已经连续 5 年免耕、土壤相对板结,深松的正面作用大于负面,取得明显增产效果。但后续几年,土壤已经疏松,继续深松的正面作用下降,而负面影响却不断积累,导致增产效应递减。年年深松到一定时间,投入将大于产出。以秋深松为例,年均产小麦 8 t/hm²、玉米 9 t/hm²,实施秋深松的第 3 年,增产幅度降为 1.9%,增收小麦 152 kg/hm²、玉米 171 kg/hm²,合计 577 元/hm²,深松作业费用 600 元/hm²,投入大于产出。粗略看出,增产幅度降到 2% 左右即为投入大于产出的临界点,从表 1 可见,夏深松第 5 年、秋深松第 3 年增产幅度降到临界点。

4 结论

(1)目前一年两熟地区持续免耕相比传统耕作大多数仍然是增产的。但深松有利于把保护性耕作保水保土的优势,更好地转化为产量优势,因此保护

性耕作免耕体系中引入深松,是一项可行的增产措施。基于深松对产量影响的两面性,既有疏松土壤、增加持水量等正面影响,也有降低播种质量、减慢土壤有机质积累等负面影响,深松不是一定增产增收。需要把握好深松的季节、年限、机具与作业时机等。

(2)从试验初步结果看,夏深松产量高于秋深松,保持增产的时间较长,作业费用较低。建议大面积推广应用,有利于农户增产增收,但在夏季干旱严

重、灌溉条件缺乏的地区,在玉米青贮、重型收获机压实严重的地区等,应选择秋深松。

(3)年年深松存在增产效应递减现象,到一定年限投入将大于产出,多年连续深松不可取。初步试验看,夏深松5年、秋深松3年左右将出现投入大于产出的拐点。深松应该有间隔地合理进行,深松周期因地区、气候、土壤、作物而不同,建议按区域开展专项试验。

参 考 文 献

- 1 赵伟,张文春,周志立,等. 深松旋耕组合作业机的研制与试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(1):125-128. ZHAO Wei, ZHANG Wenchun, ZHOU Zhili, et al. Development and experimental research of combined subsoiling and rotary tilling set[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 125-128. (in Chinese)
- 2 李艳龙,刘宝,崔涛,等. 1SZ-460型杠杆式深松机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):37-40. LI Yanlong, LIU Bao, CUI Tao, et al. Design and field experiment on 1SZ-460 lever-type subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 37-40. (in Chinese)
- 3 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 Xia, ZHANG Dongxing, WANG Weixin, et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 17-24. (in Chinese)
- 4 张军昌,闫小丽,林泽坤,等. 自激式振动深松整地机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):44-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160907&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.007. ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, LIN Zekun, et al. Design and experiment of self exciting vibration deep loosening and sub soiling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 44-49. (in Chinese)
- 5 邱立春,李宝筏. 自激振动深松机减阻试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(6):72-76. QIU Lichun, LI Baofa. Experimental study on the self-excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 72-76. (in Chinese)
- 6 周桂霞,邬雨昕. 通径系数法研究深松铲关键参数与牵引阻力的关系[J]. 农机化研究,2009,31(3):53-55.
- 7 李霞,付俊峰,张东兴,等. 基于震动减阻原理的深松机牵引阻力试验[J]. 农业工程学报,2012,28(1):32-36. LI Xia, FU Junfeng, ZHANG Dongxing, et al. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- 8 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?file_no=20120812&flag=1. 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)
- 9 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?file_no=20140422&flag=1. 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)
- 10 何进,李洪文,高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):62-67. HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 62-67. (in Chinese)
- 11 朱瑞祥,张军昌,薛少平,等. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):145-147. ZHU Ruixiang, ZHANG Junchang, XUE Shaoping, et al. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 145-147. (in Chinese)
- 12 苏美霞,李玉宏. 玉米深松改土保护性耕作技术及其效应试验研究[J]. 现代农业科技,2011(6):55-59.
- 13 高焕文,李洪文,王兴文. 旱地深松试验研究[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(4):126-133.
- 14 李霞,汤明军,张东兴,等. 深松对土壤特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(23):65-69. LI Xia, TANG Mingjun, ZHANG Dongxing, et al. Effects of sub-soiling on soil physical quality and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 65-69. (in Chinese)
- 15 徐华. 农机深松技术应用及与传统耕作效益对比研究[J]. 自然科学(全文版),2016(10):292.
- 16 阎晓光,李洪,王青水,等. 不同深松时期对旱地春玉米水分利用状况及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(6):165-170.
- 17 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 Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 7-15. (in Chinese)
- 18 张秋丽. 机械深松整地的作用及其机具特点分析[J]. 工程技术,2017(6):44-45.
- 19 ZHANG Yujiao, WANG Rui, WANG Shulan, et al. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dryland wheat-maize rotation system[J]. Field Crops Research, 2017, 209(1): 151-158.
- 20 MUNKHOLM L J, HECK R J, DEEN B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 127(3): 85-91.
- 21 DAIGH A M, DICK W A, HELMERS M J, et al. Yields and yield stability of no-till and chisel-plow fields in the Midwestern US Corn Belt[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 243-253.
- 22 高焕文,何明,尚书旗,等. 保护性耕作高产高效体系[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):35-38,49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130607&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.007. GAO Huanwen, HE Ming, SHANG Shuqi, et al. High yield and benefit system for conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 35-38, 49. (in Chinese)