doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010

油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验

刘晓鹏[1,2]　肖文立[1,2]　马　磊[1,2]　刘立超[1,2]　万国伟[1,2]　廖庆喜[1,2]
(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070)

摘要:针对冬油菜机械化播种需开畦沟避免渍害的要求,解决长江中下游地区土壤黏重板结、含水率波动大,导致播种时同步开畦沟的稳定性难以保证的实际问题,设计了油菜联合直播机开畦沟系统,提出了一种配合铧式前犁完成开畦沟功能的组合式船型开沟器。根据土壤切削、挤压和犁体曲面形成原理,分析了组合式船型开沟器的触土曲面力学特性,确定了其主要结构参数。以工作幅宽为 2 300 mm 的 2BFQ-8 型油菜联合直播机为试验平台,对铧式后犁、船式开沟犁、组合式船型开沟器 3 种不同结构型式开沟器,在平均土壤含水率为 21.4%、31.4%、46.6%,与之对应的平均土壤坚实度为 1 320、846、539 kPa 的 3 种工况下的稻茬田开展了开畦沟性能比较试验,并测绘畦沟沟型断面。试验结果表明:3 种工况条件下,组合式船型开沟器均能开出沟宽 244.0~271.7 mm、沟深 194.0~229.5 mm 的梯形沟,沟宽和沟深稳定性系数均达 90% 以上。开沟后种床带厢面宽度稳定,宽度达 2 039.0~2 051.5 mm,满足油菜种植开畦沟的农艺要求。

关键词:稻茬田;畦沟;油菜联合直播机;组合式船型开沟器;沟型断面;试验
中图分类号:S225.99　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)11-0079-09

Design and Ditching Quality Experiment on Combined Ship Type Opener of Direct Rapeseed Seeder

LIU Xiaopeng[1,2]　XIAO Wenli[1,2]　MA Lei[1,2]　LIU Lichao[1,2]　WAN Guowei[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Considering the facts that the winter rapeseed is vulnerable to waterlogging, the furrow should be ditched while mechanical planting. The soil of middle and lower reaches of Yangtze River is sticky and its moisture content fluctuates greatly, which leads the stability of the furrow difficult to be guaranteed at the time of planting. In order to solve the above problems, the design of ditching furrows system for direct rapeseed seeder was carried out, and a combined ship type opener was proposed to achieve ditching the furrow. According to the principle of soil sliding and plow forming, the main structure and technical parameters of combined ship type opener were analyzed and determined. Based on the 2BFQ-8 direct rapeseed seeder whose work width was 2 300 mm, the ditching performance experiment on rear plow, ship type plow and combined ship type opener was carried out in rice stubble field, whose moisture content was 21.4%, 31.4% and 46.6%, soil compactness was 1 320 kPa, 846 kPa and 539 kPa. The furrow sections of furrows were mapped. The ditching performance experiment results indicated that shape of furrows ditched by ship type opener were more stable than that ditched by rear plow, and the width of seed bed which measured after ditched furrows by ship type opener was stable. The width and depth of furrows which ditched by combined ship type opener was 244.0~271.7 mm and 194.0~229.5 mm, its width stability coefficient and depth stability coefficient were more than 90%. The width of seed bed after ditching was 2 039.0~2 051.5 mm. The experiment result revealed that the furrows ditched by combined ship type opener satisfied the actual production requirements of ditching furrows. The research conclusion had great theoretical value and practical significance to the design of opener which worked under the

收稿日期:2017-02-28　修回日期:2017-03-27
基金项目:农业部公益性行业科研专项(201503118-06)、农业部科研杰出人才及创新团队项目、湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662017PY006)
作者简介:刘晓鹏(1989—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail:conquermygod@163.com
通信作者:廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail:liaoqx@mail.hzau.edu.cn

condition of soil with high moisture content.

Key words: rice stubble field; furrow; rapeseed direct seeder; combined ship type opener; furrow sections; experiment

引言

长江中下游地区是我国冬油菜主要种植区域,主要采用稻油轮作的种植模式。该种植区土壤黏重板结、雨水充沛,春、秋两季降水量往往超过油菜正常生长需水量,油菜在生长的苗期和花期易遭受渍害,造成严重减产[1-4]。因此,播种作业时要求种床厢面两侧开出用于排水的畦沟。传统的油菜种植开畦沟主要以人工开沟为主,该方式工序繁多、劳动强度大、生产成本高,制约了油菜生产规模的扩大和效益提高。近年来,随着油菜播种机械化程度的提高,人工作业逐渐被机械化作业取代。农田机械化开畦沟主要有两种方式:一种是先开畦沟再进行播种,此种方法需先后用不同机器完成开畦沟和播种作业,不仅费时费力,还造成机器对地面的反复压实,播种作业时会破坏已开好的沟型;另一种是使用油菜联合播种机同步完成开畦沟和播种作业,采用此种方法进行开畦沟作业已逐渐成为趋势。开畦沟土壤工作部件为油菜联合播种机的关键部件,其效果直接影响油菜播种机的作业质量。

目前国内外已有众多学者对农田开沟技术领域进行了研究[5-19],但研究对象主要为大型农田开沟机具,或者是研究机具不适用于长江中下游地区稻茬田的开畦沟作业。华中农业大学工学院研制的 2BFQ-8 型油菜联合直播机采用前后犁组合式开畦沟,铧式前犁破土、翻垡,铧式后犁清沟整形,能最终形成完整畦沟。张青松等[20-21]对铧式前犁的犁体曲面进行分析并优化,实现了铧式前犁的降附减阻。前后犁组合开畦沟结构简单、能耗低,在适宜工况下能开出较稳定畦沟。在土壤黏重板结、含水率高的工况下,铧式前犁能很好实现破土功能,但铧式后犁易出现粘土、壅土的现象,导致犁体触土曲面几何形状改变,开出的畦沟沟型不稳定,无法实现清沟整形的功能。铧式后犁随机组前进过程中不断堆积拖土,致使种床厢面变窄,降低种床带两侧油菜成苗率。针对长江中下游地区稻茬田土壤黏重板结、含水率波动大的工况,结合 2BFQ-8 型油菜联合直播机铧式后犁存在的问题,本文设计一种组合式船型开沟器,配合铧式前犁使用,以期实现开出稳定畦沟,并对不同工况下的稻茬田进行田间开畦沟性能试验,测绘畦沟沟型断面,对开沟质量进行评价。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

2BFQ-8 型油菜联合直播机主要由主机架、传动系统、仿形驱动地轮、旋耕装置、开畦沟系统、排种系统、排肥系统、气力系统组成,如图 1 所示。该机能一次性完成旋耕、施肥、播种、开畦沟作业。开畦沟系统主要由铧式前犁、组合式船型开沟器组成。两铧式前犁对称布置于直播机侧板前部,两组合式船型开沟器对称布置于直播机侧板后部。船式开沟犁、整形拖板、限位调节杆、调节装置构成组合式船型开沟器的成型体。铧式前犁与组合式船型开沟器在纵向位置均上下可调,安装时保证两者耕深一致。整形拖板前部与船式开沟犁铰接,后部通过限位调节杆与固定装置连接,通过调节限位调节杆长度保证整形拖板底平面与水平面平行。

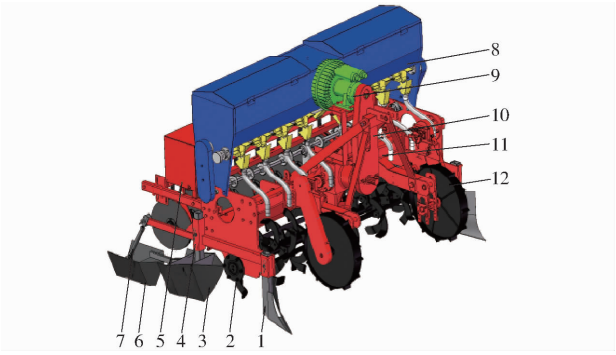


图 1 2BFQ-8 型油菜联合直播机结构示意图

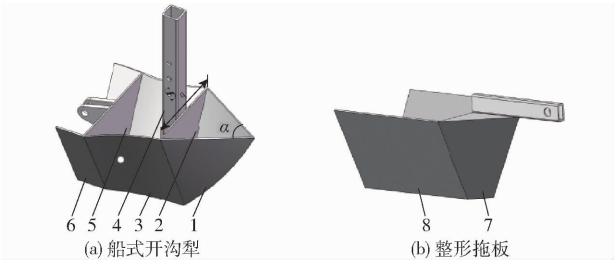
Fig. 1 Structural diagram of 2BFQ-8 rapeseed direct seeder

1. 铧式前犁 2. 旋耕装置 3. 船式开沟犁 4. 固定装置 5. 排种系统 6. 整形拖板 7. 限位调节杆 8. 排肥系统 9. 气力系统 10. 传动系统 11. 主机架 12. 仿形驱动地轮

1.2 工作原理

组合式船型开沟器主要工作部件为船式开沟犁和整形拖板,如图 2 所示。船式开沟犁为钝角开沟器,由犁柱、犁壁、犁尾翼、三角连接板、梯形连接板、下底板焊合形成。犁柱上开有若干定位孔,实现深度上下可调。船式开沟犁与土壤间相互作用可分为切削、挤压、平整 3 个过程。对称布置的犁壁为船式开沟犁的主要触土曲面,犁壁由破土曲面和整形曲面部分构成。破土曲面与三角连接板交汇形成上宽下窄的切削刃口,实现对土壤的切削。整形曲面为船式开沟犁实现开沟成型的主要功能,通过对土壤的侧向挤压,形成完整沟型。当土壤流动性良好时,经船式开沟犁挤压作用后的部分土壤会回流至沟

底，整形拖板前部推压面将沟底浮土沿前进方向挤推和两侧挤压，拖板侧壁对沟壁压平，对畦沟进行 2 次整形。



(a) 船式开沟犁　　(b) 整形拖板

图 2　组合式船型开沟器触土部件结构示意图

Fig. 2　Structural diagrams of soil-engaging component of combined ship type opener

1. 犁壁破土曲面　2. 三角连接板　3. 犁壁整形曲面　4. 犁柱　5. 梯形连接板　6. 犁尾翼　7. 拖板推压面　8. 拖板侧壁

2　组合式船型开沟器设计

船式开沟犁的切削刃口和整形曲面、整形拖板的推压面为主要触土曲面，其结构决定了组合式船型开沟器的开沟性能。根据油菜种植开畦沟要求，设计的组合式船型开沟器拟开出沟深 150 ~ 250 mm、上沟宽 250 ~ 350 mm、沟底宽 80 mm 的梯形畦沟。

2.1　船式开沟犁切削刃口设计与分析

2.1.1　刃口曲线

对称布置的船式开沟犁破土曲面交汇形成刃口曲线，本文设计选用圆弧曲线作为刃口曲线，建立圆弧曲线坐标系，圆心为 O_1，如图 3 所示。选取圆弧曲线上两点 $A(x_1,y_1)$、$B(x_2,y_2)$，A、B 两点的滑切角分别为 γ_1、γ_2。

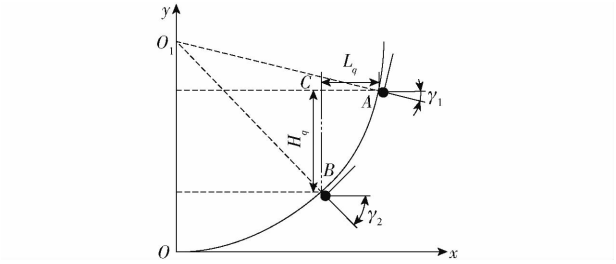


图 3　刃口曲线设计示意图

Fig. 3　Sketch of blade curve

刃口曲线 AB 的方程为

$$y = R + \sqrt{R^2 - x^2} \tag{1}$$

式中　R——圆弧半径，mm

由图 3 中几何关系可知

$$\begin{cases} H_q = y_1 - y_2 \\ L_q = R\cos\gamma_1 - R\cos\gamma_2 \\ l_{OO_1} = R\sin\gamma_1 + y_1 = R\sin\gamma_2 + y_2 \end{cases} \tag{2}$$

式中　H_q——刃口曲线高度，mm

L_q——刃口曲线开度，mm

联立式(1)、(2)可得，刃口曲线 AB 的方程为

$$y = \frac{H_q}{\sin\gamma_2 - \sin\gamma_1} + \sqrt{\frac{H_q^2}{(\sin\gamma_2 - \sin\gamma_1)^2} - x^2} \tag{3}$$

根据上述分析可知，起始滑切角 γ_1、终止滑切角 γ_2、刃口曲线高度 H_q 决定刃口曲线 AB 的形状。设计船型开沟器理论开沟深度为 150 ~ 250 mm，切削刃口的一侧与种床带厢面土壤作用，经旋耕作用后，种床带厢面土壤高度上升，故刃口曲线高度应略高于理论开沟深度最大值，取 $H_q = 300$ mm。滑切角从 A 点到 B 点过程中逐渐增大，即 $\gamma_1 < \gamma_2$。根据文献[22 - 23]，取土壤摩擦角 φ 为 23°，当起始滑切角大于 23°、终止滑切角在 35° ~ 55°时，与土壤产生滑切阻力较小，取 $\gamma_1 = 23°$，$\gamma_2 = 45°$。

2.1.2　刃口角

船式开沟犁的两破土曲面在顶点处的夹角 α 即为切削刃口的最大刃口角，如图 2 所示。根据几何关系可知

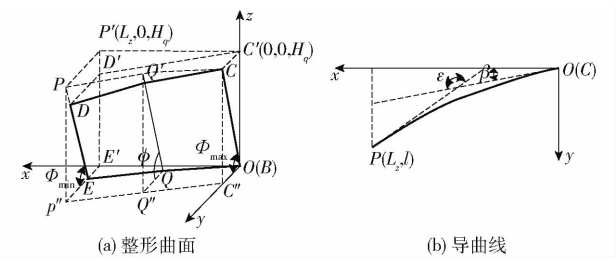
$$\alpha = 2\operatorname{arccot}\frac{2H_q(\cos\gamma_1 - \cos\gamma_2)}{S_q(\sin\gamma_2 - \sin\gamma_1)} \tag{4}$$

式中　S_q——切削刃口开度，mm

由式(4)可知，决定刃口角的因素为起始滑切角 γ_1、终止滑切角 γ_2、刃口曲线高度 H_q 和切削刃口开度 S_q。切削刃口为上宽下窄的楔面，根据文献[24]，刃口角小于 180° - 2φ，即小于 134°时，土壤颗粒沿刃口楔面具有向后滑移趋势。切削刃口开度直接影响犁壁整形曲面倾斜程度，通过后续对整形曲面分析确定切削刃口开度 S_q，进而计算并验证最大刃口角。

2.2　船式开沟犁整形曲面分析

船式开沟犁的犁壁整形曲面借鉴铧式犁犁体曲面设计，采用水平直元线法形成，曲面形成原理如图 4 所示。直元线 QQ' 沿导曲线 CP 按元线角 Φ 均匀减小的规律运动形成曲面 $BCPE$，截取部分曲面 $BCDE$ 即为整形曲面。



(a) 整形曲面　　(b) 导曲线

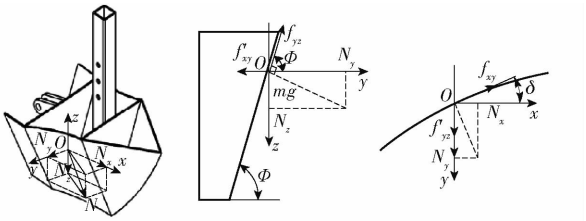
图 4　整形曲面形成原理图

Fig. 4　Schematic diagrams of plastic surface

2.2.1　挤压过程的力学分析

船式开沟犁对土壤的挤压可看作一个侧向倒置的犁体曲面对土壤作用，选取整形曲面上任意一点

的土粒质点 O 为研究对象，建立如图 5a 所示的空间坐标系，x 方向为船式开沟犁作业时前进方向，前进速度为 v，整形曲面对土粒质点的瞬时压力为 N。



(a) 空间受力分析 (b) yOz平面受力分析 (c) xOy平面受力分析

图 5 整形曲面挤压力学分析

Fig. 5 Mechanical analyses on extrusion shape of plastic surface

土粒质点沿 x、y、z 方向的动力学方程为

$$\begin{cases} N_x + f_{xy}\cos\delta = ma_x \\ N_y + f'_{yz} - f'_{xy} = ma_y \\ N_z - f_{yz}\sin\Phi + mg = ma_z \\ N_x = N_y\tan\delta \\ N_z = N_y\cot\Phi \\ f'_{xy} = f_{xy}\sin\delta = \tan\varphi\sin\delta\ \sqrt{N_x^2 + N_y^2} \\ f'_{yz} = f_{yz}\cos\Phi = \tan\varphi\cos\Phi\ \sqrt{N_y^2 + N_z^2} \\ N = \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \end{cases} \tag{5}$$

式中 m——土粒质点质量，kg

g——重力加速度，N/kg

N_x——土粒质点所受瞬时压力在 x 方向上的分力，N

N_y——土粒质点所受瞬时压力在 y 方向上的分力，N

N_z——土粒质点所受瞬时压力在 z 方向上的分力，N

f_{xy}——土粒质点在 xOy 平面内所受摩擦力，N

f_{yz}——土粒质点在 yOz 平面内所受摩擦力，N

f'_{xy}——f_{xy}在 y 方向上的分力，N

f'_{yz}——f_{yz}在 y 方向上的分力，N

Φ——元线角，(°)

δ——整形曲面起土角，(°)

a_x——土粒质点在 x 方向上的加速度，m/s^2

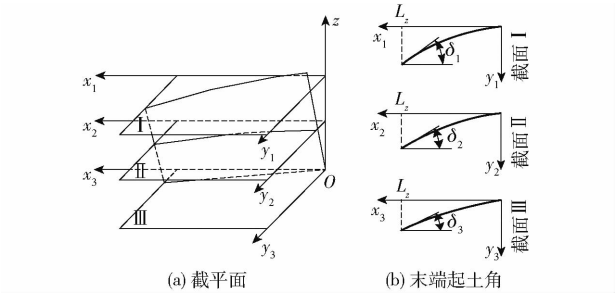
a_y——土粒质点在 y 方向上的加速度，m/s^2

a_z——土粒质点在 z 方向上的加速度，m/s^2

由式(5)可得

$$\begin{cases} a_x = \dfrac{N(\tan\delta + \tan\varphi)}{m\sqrt{1 + \cot^2\Phi + \tan^2\delta}} \\ a_y = \dfrac{N[1 + \tan\varphi(\cot\Phi - \tan\delta)]}{m\sqrt{1 + \cot^2\Phi + \tan^2\delta}} \\ a_z = \dfrac{N(\cot\Phi - \tan\varphi)}{m\sqrt{1 + \cot^2\Phi + \tan^2\delta}} + g \end{cases} \tag{6}$$

从挤压力学分析可知，土壤摩擦角 φ、元线角 Φ、起土角 δ 为影响整形曲面挤压效果和前进阻力的主要因素。根据式(6)可知，当元线角 $\Phi < 90° - \varphi$ 时，a_z越大，整形曲面对土壤向下挤压作用效果越好。整形曲面底部较顶部更加平滑，末端起土角更小，如图 6 所示。当土粒沿整形曲面运动时，整形曲面长度 L_z越大，前进速度 v 越小，土粒受整形曲面挤压时间长，向下位移大，土粒离开整形曲面时的末端起土角越小，土粒在挤压过程中一直处于起土角较小的位置。起土角 δ 越小，a_y越大，a_x越小，对土壤侧向挤压力越大，前进阻力越小。



(a) 截平面 (b) 末端起土角

图 6 末端起土角变化规律

Fig. 6 Variation regularity of end lifting angle

2.2.2 整形曲面参数分析

作业时，土壤经过整形曲面 $BCDE$ 的侧向挤压作用向侧下方运动，由 BC 边界进入，最终由 DE 边界离开。图 4a 中梯形 $DD'EE'$为船式开沟犁开出的理论沟型右半部分。由几何关系可知，导曲线开度为

$$l = l_{PP'} - \frac{1}{2}S_q \tag{7}$$

根据整形曲面挤压过程的力学分析，当元线角 $\Phi < 90° - \varphi$ 时，整形曲面对土壤向下挤压效果越好。整形曲面最大元线角为起始元线角，起始元线角越小，对土壤向下挤压作用越强。但起始元线角过小，则切削刃口开度 S_q过大，导致导曲线开度过小。刃口曲线分析中，取摩擦角为 23°，故设计整形曲面最大元线角 Φ_{max}为 67°。切削刃口开度 S_q为 255 mm。

依据设计的理论沟型，结合图 4a 中几何关系，有

$$\begin{cases} \dfrac{l_{DD'} - l_{EE'}}{l_{PP'} - l_{QQ'}} = \dfrac{l_{D'E'}}{l_{P'E'}} \\ 125\ \text{mm} \leqslant l_{EE'} \leqslant 175\ \text{mm} \\ l_{EE'} = 40\ \text{mm} \\ l_{D'E'} = 250\ \text{mm} \end{cases} \tag{8}$$

由式(8)可得 142 mm$\leqslant l_{PP'} \leqslant$202 mm，导曲线开度 l 随 $l_{PP'}$值增大而增大。根据上述土粒质点动力

学分析，当前进速度 v 一定时，导曲线开度 l 越小、长度 L_z 越大时，整形曲面越平滑，船式开沟犁所受牵引阻力越小、挤压力越大。由于土粒沿 x 方向做减速运动，若导曲线长度 L_z 过大，土粒因长时间减速而导致速度反向，土壤沿整形曲面向前堆积，失去挤压效果。为保证整形曲面平滑且具有较好土壤挤压能力，取 $l_{PP'}$ = 180 mm，导曲线开度与长度比值为 1∶4。按式(7)计算可得导曲线开度 l 为 53 mm，导曲线长度 L_z 为 212 mm。整形曲面起土角越小，侧向挤压力越大，前进阻力越小。导曲线 CP 的始端切线夹角 β 即为整形曲面的始端起土角，设计整形曲面起土角沿导曲线方向均匀增大，始端切线夹角 β 为 0°，导曲线两端切线夹角 ε 为 152°。整形曲面元线角按均匀减小规律变化，最小元线角 $\Phi_{\min}$ 为 64.98°。

根据整形曲面参数分析，由式(4)计算可得船式开沟犁最大刃口角 α 为 64.37°，满足刃口对土壤切削具有滑切作用的要求。

2.3　整形拖板

整形拖板主要触土面如图 2b 所示，由于整形拖板置于船型开沟器后部，故所受前进阻力小，设计对称布置的推压面为平面，其交汇形成的刃口曲线为直线，图 7 中平面 $GHJK$ 即为推压面。整形拖板在船型开沟器开沟后的基础上进行整形，故整形拖板的横向轮廓 $GG'K'K$ 应与船式开沟犁开沟后的理论轮廓一致。选取挤推平面上任意一点处的土粒质点 M 为研究对象，建立如图 7 中所示的空间坐标系。挤推平面对土粒质点沿 x、y、z 方向的挤推力分别为 F_x、F_y、F_z。

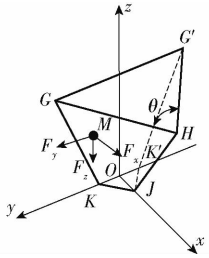


图 7　整形拖板推压平面

Fig. 7　Thrust plane of plastic planker

由空间力系关系可得

$$\tan\frac{\theta}{2}=\frac{F_x}{F_y} \tag{9}$$

式中　θ——整形拖板刃口角，(°)

推压面主要通过沿前进方向挤推力 F_x 和侧向挤压力 F_y 作用，清理沟底土壤。由式(9)可知，整形拖板刃口角过大，导致整形拖板侧向挤压能力弱，整形拖板不断向前推挤土壤，与船式开沟犁之间易发生堵土。整形拖板刃口角过小，整形拖板向前挤推沟底土壤的能力不足，沟底土壤沿两侧运动，当土壤流动性良好时，由于此时土壤压缩性差，经拖板侧壁作用后的土壤仍会回流沟底，无法起到清理沟底的作用。为保证整形拖板同时具有较好的向前挤推和侧向挤压能力，选取整形拖板刃口角 θ 为 90°，此时前进方向推力 F_x 和侧向挤压力 F_y 相等。

3　开畦沟性能试验

3.1　试验设备

试验机具为华中农业大学研制的工作幅宽为 2 300 mm 的 2BFQ－8 型油菜联合直播机。试验器材包括：直尺(500 mm)、卷尺(3 m)、磁性水平尺(三箭工具有限公司，精度 0.002 9°)、土壤坚实度仪(浙江托普仪器有限公司，TJSD－750Ⅱ型，±0.5% FS)、土壤水分测试仪(浙江托普仪器有限公司，TZS－2X 型，0.01%)、自制沟型测绘装置(图 8)。



图 8　沟型测绘装置

Fig. 8　Mapping device for ditch section

1. 水平尺　2. 测绘架体　3. 钢棒

3.2　试验方法

试验分别于 2016 年 10 月 5 日在华中农业大学现代农业科技试验基地，11 月 3 日、11 月 6 日在荆州市江陵县三湖农场进行。3 种试验工况的田块均为机收后稻茬田，土壤类型均为黄棕壤，试验田块为稻油轮作，试验前未对地表残茬进行清理，田块特性参数见表 1。试验选用铧式后犁、船式开沟犁(未安装整形拖板)、组合式船型开沟器为试验对象，如

表 1　田块特性参数

Tab. 1　Characteristics parameters of experimental field

工况	平均土壤含水率(1～25 cm)/%	平均土壤坚实度(1～25 cm)/kPa	容重/(g·cm^{-3})	孔隙度/%	平均留茬高度/cm	秸秆覆盖量/(g·m^{-2})
工况 1	21.4	1 320	1.58	40.4	15.1	654
工况 2	31.4	846	1.32	50.2	16.1	1 300
工况 3	46.6	539	1.24	53.2	15.4	1 246

图 9 所示。配套动力为东方红 LX954 拖拉机,通过预试验确定拖拉机液压手柄位置与机具开沟深度的关系,调节手油门至最大位置保证作业速度一致,机组前进速度为慢Ⅱ挡。试验机组沿直线方向作业距离为 30 m,选取行程中间 10 m 区域为测量区域,沿机组前进方向每隔 2 m 对畦沟沟型断面和种床带厢面宽度进行测量,每个行程畦沟测量 6 个点。每组试验重复 3 次。



(a) 铧式后犁 (b) 船式开沟犁 (c) 组合式船型开沟器

图 9 试验机具示意图

Fig. 9 Sketches of experiment implements

采用沟型测绘装置进行测绘时,使架体中间位置与畦沟中心位置对齐,调整水平尺水平。将长度为 500 mm 钢棒从左至右依次竖直插入孔距为 20 mm 的定位孔,待钢棒底端接触地表时,测量钢棒顶端与架体上表面间的距离,并记录数据,通过 Excel 软件拟合出沟型断面图。通过沟型断面图计算沟宽、沟深、沟型面积。沟宽、沟深、厢宽稳定系数根据文献[25]中相关稳定系数计算方法进行计算。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

依据试验方法,对 3 种机具在各工况下开出畦沟沟型断面参数的测量结果见表 2。

铧式后犁在工况 1 下能开出较稳定畦沟,机具通过性较好。但在工况 2、3 条件下,机具工作时发生堵塞现象,开出畦沟沟深较浅,沟底残留较多大块土垡。船式开沟犁和组合式船型开沟器在 3 种工况下均未发生机具堵塞现象,船式开沟犁在工况 1、2 条件下,开沟后沟底残留有一定回流浮土,但没有出现大块土垡。组合式船型开沟器在 3 种工况下均开出沟底干净、平整梯形畦沟,开沟效果如图 10 所示。

表 2 畦沟断面参数

Tab. 2 Parameters of furrow sections

试验机具	工况	试验组	平均沟宽 $\overline{W}$/mm	平均沟深 $\overline{H}$/mm	沟型断面面积 $\overline{S}$/mm^2	通过性	沟型断面形状
铧式后犁	工况 1	1	330.0	150.7	30 116	无堵塞	V 型
		2	301.3	153.2	27 734	无堵塞	V 型
		3	314.0	148.2	29 940	无堵塞	V 型
	工况 2	1	323.8	110.8	23 707	轻微堵塞	扁平 U 型
		2	331.2	107.5	20 485	轻微堵塞	扁平 U 型
		3	342.5	111.8	23 845	轻微堵塞	扁平 U 型
	工况 3	1	349.7	99.5	21 460	堵塞	无稳定形状
		2	333.8	97.7	19 376	堵塞	无稳定形状
		3	337.5	91.3	19 857	堵塞	无稳定形状
船式开沟犁	工况 1	1	243.7	156.5	20 871	无堵塞	V 型
		2	247.2	154.8	20 743	无堵塞	V 型
		3	246.8	159.0	22 536	无堵塞	V 型
	工况 2	1	263.8	182.5	32 560	无堵塞	梯形
		2	259.5	180.8	31 679	无堵塞	梯形
		3	252.5	188.5	32 218	无堵塞	梯形
	工况 3	1	262.5	224.7	37 302	无堵塞	梯形
		2	267.2	222.7	37 890	无堵塞	梯形
		3	273.0	231.2	39 907	无堵塞	梯形
组合式船型开沟器	工况 1	1	244.0	194.0	30 454	无堵塞	梯形
		2	256.7	196.2	31 324	无堵塞	梯形
		3	258.3	204.2	33 062	无堵塞	梯形
	工况 2	1	245.2	213.2	35 417	无堵塞	梯形
		2	256.7	220.8	36 028	无堵塞	梯形
		3	251.7	218.5	35 688	无堵塞	梯形
	工况 3	1	271.7	229.5	40 583	无堵塞	梯形
		2	265.0	225.7	37 832	无堵塞	梯形
		3	259.8	223.5	37 180	无堵塞	梯形



(a) 工况1　(b) 工况2　(c) 工况3

图 10　组合式船型开沟器开沟效果

Fig. 10　Effects of combined ship type opener

3.3.2　沟型断面分析

依据试验方法测绘畦沟沟型断面，随机选取铧式后犁、船式开沟犁、组合式船型开沟器在每种工况下的 6 组畦沟断面进行分析，如图 11 ~ 13 所示。

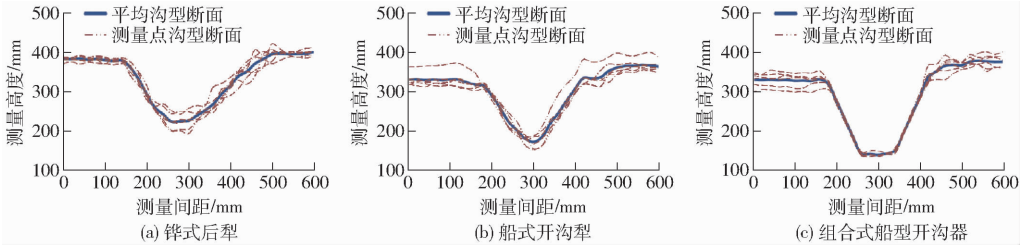


图 11　工况 1 开沟沟型断面

Fig. 11　Furrow sections in condition 1

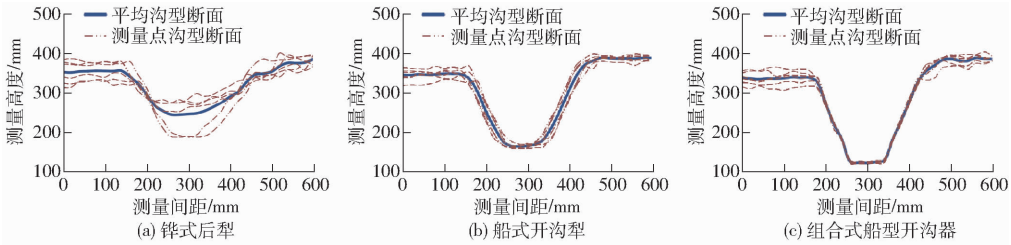


图 12　工况 2 开沟沟型断面

Fig. 12　Furrow sections in condition 2

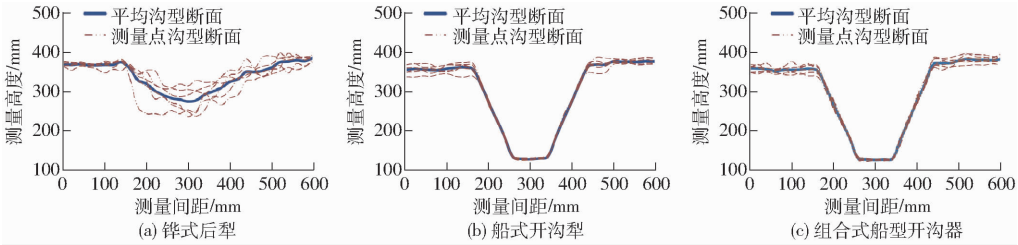


图 13　工况 3 开沟沟型断面

Fig. 13　Furrow sections in condition 3

在工况 1 条件下，土壤含水率较低、流动性较好，土壤颗粒间粘结力小、易压缩。铧式后犁和船式开沟犁开沟后仍有部分土壤沿沟壁回流至沟底，休止后形成 V 型沟，沟深均为 150 mm 左右。由于铧式后犁横向触土面积更大，开沟宽度更大，沟型显得更为扁平。组合式船型开沟器的整形拖板能同时向前挤推和侧向压实回流沟底的土壤，降低沟底填埋程度，沟深达 200 mm 左右，开出畦沟更接近理论梯形，沟型断面面积更大。

在土壤含水率较高、黏重板结的工况 2、3 条件下，铧式后犁作业过程中出现土壤粘附现象，造成犁铧入土深度不够，前行过程中雍积土壤，畦沟沟型趋于扁平，沟深仅在 100 mm 左右。随着土壤黏重程度加重，铧式后犁失去开沟成型功能，无法开出稳定形状的畦沟。随着土壤含水率上升，土壤愈发黏重，土壤颗粒间粘结力大、易压缩，船式开沟犁挤压成型后不会出现土壤回流现象，开出的畦沟能保持设计的理论梯形，与组合式船型开沟器开沟的沟型无明显差异，比铧式后犁开出畦沟的断面面积大，能增强畦沟蓄水能力。

3.3.3 沟型稳定性分析

3 种机具在不同工况下开出畦沟的沟宽、沟深稳定性系数如图 14 所示。随着土壤含水率升高,土壤黏重程度加重,铧式后犁作业时由于土壤粘附造成壅土,在工况 2、3 条件下开畦沟的沟宽、沟深稳定性显著降低,沟宽稳定性系数分别为 75.56% 和 68.79%,沟深稳定性系数分别为 73.53% 和 59.95%,开畦沟性能的稳定性次于船式开沟犁和组合式船型开沟器。

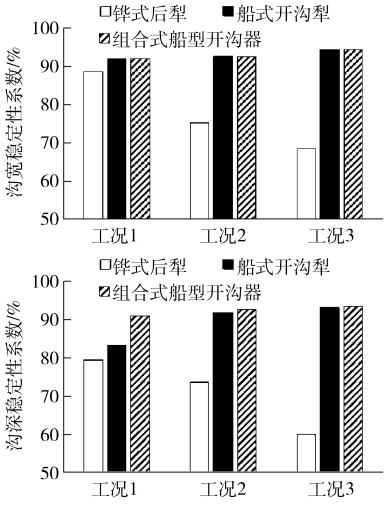


图 14 沟型稳定性分析

Fig. 14 Stability analysis of furrow sections

船式开沟犁在各工况下的开畦沟的沟宽、沟深稳定性均优于铧式后犁。船式开沟犁和组合式船型开沟器对土壤切削并向两侧挤压,平整后能保证沟宽基本与设计的理论梯形宽度一致,各工况下的沟宽稳定性系数均在 90% 以上,二者开沟沟宽稳定性无明显差异。但在土壤含水率较低的工况 1 条件下,由于船式开沟犁开沟后土壤回流填埋程度的差异性大,沟深稳定性系数仅在 80% 左右。组合式船型开沟器的整形拖板对沟底进行 2 次平整,能降低土壤回流程度,沟型与理论沟型更接近,提高了沟深稳定性。组合式船型开沟器在 3 种工况下开沟沟宽、沟深稳定性系数均在 90% 以上,开出畦沟的沟型稳定。

3.3.4 开沟对种床带厢面宽度影响

开沟后种床带厢面宽度和厢宽稳定性系数见表 3。试验机具 2BFQ-8 型油菜联合直播机播种行数为 8 行,幅宽 2 300 mm。根据油菜种植农艺要求,相邻行距应为 230 ~ 250 mm,故种床带厢面最小宽度应大于 1 610 mm。由于船式开沟犁和组合式船型开沟器在 3 种工况条件下通过性良好,未发生机具堵塞现象。开沟后种床带厢面平均宽度均大于 2 000 mm,厢宽稳定性好。在土壤黏重板结的工况 2、3 条件下,铧式后犁由于作业时机具堵塞,前进时雍积土壤造成厢面宽度变窄,平均厢面宽度小于 1 610 mm,种床带厢面宽度不稳定,播种时会破坏两侧油菜生长的种床带,降低成苗率。

表 3 开沟后种床带厢面宽度和厢宽稳定性系数

Tab. 3 Width and stability coefficient of seed bed

试验机具	工况	平均厢面宽度 L/mm	厢宽稳定性系数 U_L/%
铧式后犁	工况 1	1 698.2	96.66
	工况 2	1 594.3	89.13
	工况 3	1 582.5	88.42
船式开沟犁	工况 1	2 053.2	99.14
	工况 2	2 047.5	99.04
	工况 3	2 053.2	99.26
组合式船型开沟器	工况 1	2 042.7	98.84
	工况 2	2 051.5	98.93
	工况 3	2 039.0	99.53

4 结论

(1)针对长江中下游冬油菜种植区土壤黏重板结、含水率波动大的工况,开展了 2BFQ-8 型油菜联合直播机开畦沟系统设计,提出了一种组合式船型开沟器,利用土壤切削和挤压原理实现开畦沟作业,通过力学分析,确定了船型开沟器和整形拖板主要结构参数。

(2)开畦沟性能试验结果表明:在土壤含水率 21.4%、31.4%、46.6%,坚实度 1 320、846、539 kPa 的 3 种工况条件下,组合式船型开沟器通过性良好,开沟沟型稳定,可开出平均沟深 194.0 ~ 229.5 mm,平均沟宽 244.0 ~ 271.7 mm 的梯形沟,沟底、沟壁平整。

(3)畦沟沟型稳定性分析结果表明:组合式船型开沟器在 3 种工况下开沟的沟宽、沟深稳定性均优于铧式后犁和船式开沟犁的开沟稳定性,沟宽、沟深稳定性系数均达 90% 以上。

(4)开沟对种床带厢面宽度影响:在 3 种工况条件下,组合式船型开沟器开沟后均能保证稳定的种床带厢面宽度,在油菜直播机幅宽为 2 300 mm 时的平均厢面宽度达 2 039.0 ~ 2 051.5 mm。

参 考 文 献

1 李玲,张春雷,张树杰,等. 渍水对冬油菜苗期生长及生理的影响[J]. 中国油料作物学报,2011,33(3):247-252.
LI Ling, ZHANG Chunlei, ZHANG Shujie, et al. Effects of waterlogging on growth and physiological changes of winter rapeseed seeding[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(3): 247-252. (in Chinese)

2 宋丰萍,胡立勇,周广生,等. 渍水时间对油菜生长及产量的影响[J]. 作物学报,2010,36(1):170-176.
SONG Fengping, HU Liyong, ZHOU Guangsheng, et al. Effects of waterlogging time on Rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and

yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010,36(1):170 - 176. (in Chinese)
3 王琼,张春雷,李光明,等. 渍水胁迫对油菜根系形态与生理活性的影响[J]. 中国油料作物学报,2012,34(2):157 - 162.
WANG Qiong, ZHANG Chunlei, LI Guangming, et al. Influences of waterlogging stress on roots morphology and physiology for rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2012,34(2):157 - 162. (in Chinese)
4 陈红琳,陈尚洪,王昌桃,等. 苗期渍水胁迫对免耕直播油菜产量和品质的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(2):259 - 263.
CHEN Honglin,CHEN Shanghong,WANG Changtao,et al. Effect of waterlogging stress at seedling stage on yield and quality of directly-seeded rapeseed under no-tillage condition[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2014,30(2):259 - 263. (in Chinese)
5 姚克恒,刘世豪,夏拥军,等. 开沟机作业功耗的正交试验分析及其优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6):529 - 535.
YAO Keheng, LIU Shihao, XIA Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2011,29(6):529 - 535. (in Chinese)
6 武广伟,付卫强,董建军,等. 1KY - 40 型液压驱动农田水渠开沟机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):302 - 308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2014s149&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.049.
WU Guangwei, FU Weiqiang, DONG Jianjun, et al. Design and experiment of 1KY - 40 hydraulic drive ditcher for farmland conduit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):302 - 308. (in Chinese)
7 覃国良,廖庆喜,周善鑫,等. 基于 MATLAB 的链式开沟机功耗的优化设计与分析[J]. 湖北农业科学,2009,48(1):210 - 214.
QIN Guoliang, LIAO Qingxi, ZHOU Shanxin, et al. Optimization design and analysis of the power consumption of chain-type ditcher based on MATLAB[J]. Hubei Agricultural Sciences,2009,48(1):210 - 214. (in Chinese)
8 SOLHJOU A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A, et al. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries[J]. Biosystems Engineering,2014,127(3):41 - 49.
9 BIANCHINI A, MAGALHAES P S G. Evaluation of coulters for cutting sugar cane residue in a soil bin[J]. Biosystems Engineering,2008,100(3):370 - 375.
10 SASAKI C M, GONCALVES J L D, DA S A P. Ideal subsoiling moisture content of latosols used in forest plantations[J]. Forest Ecology and Management,2007,243(1):75 - 82.
11 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数和工作参数优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):57 - 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130810&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.010.
ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Optimized design of plough body structural and working parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(8):57 - 62. (in Chinese)
12 王徐建,宋建农,刘彩玲,等. 甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(13):16 - 23.
WANG Xujian, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(13):16 - 23. (in Chinese)
13 赵淑红,刘宏俊,张先民,等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(19):26 - 34.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and experiment of working performance of sliding push opener[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(19):26 - 34. (in Chinese)
14 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,44(2):38 - 42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the CSAE, 2013,44(2):38 - 42. (in Chinese)
15 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG - 2 型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(6):43 - 46.
LIN Jing, LIU Andong, LI Baofa, et al. 2BG - 2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):43 - 46. (in Chinese)
16 何进,李洪文,张学敏,等. 1QL - 70 型固定垄起垄机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):55 - 60.
HE Jin, LI Hongwen, ZHANG Xuemin, et al. Design and experiment of 1QL - 70 bed former for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(7):55 - 60. (in Chinese)
17 朱国辉,李问盈,何进. 2BFML - 5 型固定垄免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(2):51 - 54.
ZHU Guohui, LI Wenying, HE Jin. Design and experiment on 2BFML - 5 no-till planter for permanent raised bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(2):51 - 54. (in Chinese)
18 庄健,贾洪雷,马云海,等. 具有滑刀式缺口的圆盘开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):83 - 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2013s116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.016.
ZHUANG Jian, JIA Honglei, MA Yunhai, et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.1):83 - 88. (in Chinese)
19 赵旭,张祖立,唐萍,等. 被动式倾斜波纹圆盘破茬刀工作性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(1):64 - 67.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, TANG Ping, et al. Behavior of passive stubble-cutting disc with oblique ripples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):64 - 67. (in Chinese)
20 张青松,汲文峰,廖宜涛,等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):130 - 135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140222&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.022.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):130 - 135. (in Chinese)
21 张青松,廖庆喜,汲文峰,等. 油菜直播机开畦沟前犁曲面优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):53 - 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.008.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):53 - 59. (in Chinese)
22 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业机械出版社,2007.
23 李长宝,太史怀远. 土壤物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2013.
24 西涅科夫 Г H,潘诺夫 N M. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
25 秦宽,丁为民,方志超,等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(9):1 - 8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(9):1 - 8. (in Chinese)