

## 甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验

王徐建, 宋建农\*, 刘彩玲, 董向前, 王继承, 张超

(中国农业大学工学院农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**为解决机械化倾斜移栽甘草苗,设计甘草倾斜移栽机,融合甘草移栽的农艺要求,提出一种针对甘草秧苗倾斜移栽开沟器。建立了开沟器结构参数、工作参数与倾斜 V 型断面沟倾斜角度、沟底长度间的数学模型,通过改变开沟器切角、开沟器翼板间距、土壤休止角、开沟器速度、开沟器作业深度等因素对所设计的开沟器进行多因素正交设计。试验结果表明:所建数学模型可用于实现特定要求的倾斜 V 型断面沟的开沟器参数设计,理论和试验结果误差小于 4%。在倾斜移栽角度 30°农艺条件下,当滞后投苗系数小于 1 时,甘草秧苗的角度随滞后投苗系数的减小而减小,随开沟器速度的增大而减小;当滞后投苗系数大于等于 1 时,甘草秧苗的倾斜角度在 28°~31°之间波动,开沟器具有稳定的工作性能。该研究可为甘草倾斜移栽机的设计提供参考。

**关键词:**农业机械;设计;模型;甘草;倾斜移栽;开沟器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.003

中图分类号:S222

文献标志码:A

文章编号:1002-6819(2016)-13-0016-08

王徐建, 宋建农, 刘彩玲, 董向前, 王继承, 张超. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.003 <http://www.tcsae.org>

Wang Xujian, Song Jiannong, Liu Cailing, Dong Xiangqian, Wang Jicheng, Zhang Chao. Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(13): 16-23. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.003 <http://www.tcsae.org>

### 0 引言

甘草不仅是重要的中草药,在食品工业也得到广泛应用。随着甘草需求量的逐年增大,野生甘草资源已不能满足市场需求,人工种植甘草已成为解决甘草资源供求矛盾有效途径<sup>[1-4]</sup>。

直播种植甘草出苗、保苗率低,用种量大,生长周期长,而且根系深,造成收获时采挖困难,劳动力消耗大。相关研究表明,长根茎类中草药种植采用育苗移栽能够有效的避免根茎过长,采收时不必深挖,便于机械化收获;而且根茎生长健壮、整齐,质量好、产量高。育苗移栽是甘草人工种植的理想模式<sup>[5-9]</sup>。

中国是甘草等长根茎类中草药的主产区,甘草在国外并没有大面积的人工种植,因此国外没有相关成型的甘草类移栽机出现。在长根茎类作物移栽领域,国外相关研究学者通过对链夹式移栽机进行结构优化设计,实现了红薯秧茎的竖直栽、倾斜栽、船底栽等方式,该类移栽机通过复杂的机械机构在一定程度上能够完成甘草秧苗的移栽,但是由于相对较低的移栽效率以及劳动力的大量

消耗使得该类移栽机在实现甘草移栽的推广过程中受到了一定的限制<sup>[7-9]</sup>。

近年来,相关学者对甘草移栽机进行了研发,如吉林省农业机械研究院和吉林省白城市农牧机械化研究院联合研制的 Z2G-2 型甘草类移栽机以及石河子大学研制的输苗带甘草移栽机初步探索了甘草种苗的沟底水平移栽;在研究机械化倾斜移栽甘草种苗的过程中,富来威红薯移栽机在国外链夹式红薯移栽机的基础上改进的链夹式移栽机通过复杂的机械结构在一定程度上实现了甘草种苗的倾斜移栽<sup>[5-6, 10-14]</sup>;为简化移栽机械结构,相关专家学者研究通过种苗带固定种苗,移栽整条种苗带的方式实现甘草种苗多角度倾斜移栽作业,由于移栽作业过程采用前期种苗带制作准备、种苗带移栽两步走的方式,造成劳动力消耗大,移栽成本高,推广使用难度大<sup>[15-16]</sup>。总体看,目前中国对甘草移栽机的研究仍处于起步阶段,尚未见到成熟实用的甘草移栽机报道,在甘草生产中,迫切需要一种新的甘草移栽方式实现快速倾斜移栽甘草苗的要求<sup>[17-21]</sup>。

开沟器是甘草移栽机的关键部件,目前生产中常用开沟器仅能实现甘草苗的沟底水平移栽<sup>[22-25]</sup>,难以满足不同地区甘草移栽方式的要求。为实现甘草苗倾斜移栽的机械化作业,本文提出一种甘草倾斜移栽开沟器,通过控制土壤颗粒回流实现甘草苗的倾斜移栽,本文通过对开沟器作业机理进行分析与试验,以期为甘草移栽机的设计提供参考。

### 1 开沟器结构及工作原理

甘草倾斜移栽开沟器(如图 1 所示)主要包括芯铧 1、

收稿日期:2015-09-25 修订日期:2016-03-28

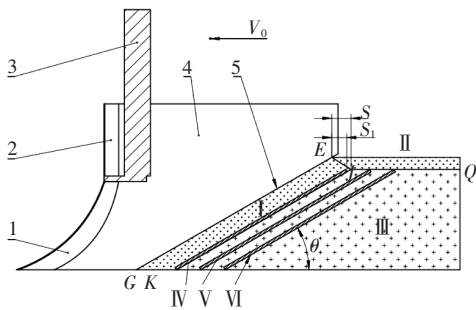
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015GX003);教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介:王徐建,男,山东莒南人,博士生,主要从事农业机械与农业装备研究。北京 中国农业大学工学院,100083。Email: wxj585@163.com  
\*通信作者:宋建农,男,河北藁城人,教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究。北京 中国农业大学工学院,100083。

Email: songjn@cau.edu.cn

土壤分流板 2、立柱 3、开沟器翼板 4、土壤回流口 5,其中开沟器前端刃口曲线为渐开线。

如图 1 所示,开沟器的工作时,开沟器沿  $V_0$  方向前进,首先由芯铧切开土壤形成 U 型断面的沟槽,开沟器尾部土壤在重力作用下通过倾斜土壤回流口流入 U 型沟槽内,形成与底面具有一定倾斜角度  $\theta$  的倾斜 V 型断面沟。将甘草苗适时投放于倾斜 V 型断面沟的沟底 JK 上,继续前行的开沟器使土壤颗粒连续不断流入沟内,完成甘草种苗的自动覆土。图 1 中 IV、V、VI 为完成倾斜移栽后的甘草苗; I 区为回流过程中的土壤颗粒形成的倾斜 V 型断面沟的侧边; II 区为土壤回流结束后水平 V 型断面沟侧面; III 区为完成甘草苗倾斜移栽和覆土后甘草苗和土壤颗粒共存状态。



1. 芯铧 2. 土壤分流板 3. 立柱 4. 开沟器翼板 5. 土壤回流口  
1. Core ploughshare 2. Plate of soil diversion 3. Shovel column 4. Wing of plate 5. Port of soil backflow

注:  $V_0$  为开沟器前进速度,  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; JK 为倾斜 V 型断面沟沟底长度, mm;  $\theta$  为倾斜 V 型沟倾斜角度,  $(^\circ)$ ; GE 为土壤回流口土壤回流段; JQ 为土壤回流后水平 V 型沟沟底; IV, V, VI 为倾斜移栽的甘草秧苗; I 区为倾斜 V 型断面沟侧面; II 区为土壤回流后水平 V 型沟侧面; III 区为土壤回流完成甘草苗土壤颗粒共存区域; S 为倾斜 V 型断面沟形成滞后距离, mm;  $S_1$  为甘草苗滞后投苗距离(甘草苗头部(芽端)与回流土壤与开沟器翼板相交的末端点 E 间距), mm。下同。

Note:  $V_0$  is speed of opener,  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; JK is ditch length of inclined V type cross section groove, mm;  $\theta$  is angel of inclined V type cross section groove,  $(^\circ)$ ; GE is soil back section of soil backflow port; JQ is ditch of horizontal V groove after backflow of soil particles; IV, V, VI is inclined transplanted licorice; I is side of inclined V type cross section groove; II is side of groove after soil backflow; III is area with both licorice and soil particles after soil backflow; S is lag distance of V type inclined groove, mm;  $S_1$  is distance of lag of licorice seedling, mm. Same as below.

图 1 开沟器结构及成型倾斜沟沟型剖面图

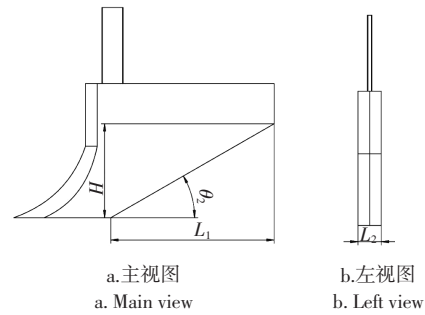
Fig.1 Opener structure and inclined trench section

## 2 开沟器参数设计

为确定开沟器工作参数、作业参数,实现甘草倾斜移栽的要求,本文在研究开沟器成型机理时建立开沟器作业深度、结构参数与倾斜 V 型断面沟相关参数以及投苗滞后系数与移栽后秧苗角度的数学模型。研究过程中将土壤颗粒视作不变形、不黏结的刚体结构。

### 2.1 开沟器参数与土壤回流关系模型的建立

开沟器结构参数如图 2 所示,两竖直翼板间距为  $L_2$ ,翼板上土壤回流口与水平面夹角为  $\theta_2$ ,土壤回流口底部长度为  $L_1$ ,尾部高度为  $H$ ,其值大于开沟器作业深度  $D_1$ 。



注:  $H$  为土壤回流口尾部高度, mm;  $\theta_2$  为土壤回流口角度,  $(^\circ)$ ;  $L_1$  为土壤回流口底部长度, mm;  $L_2$  为翼板间距, mm。下同。

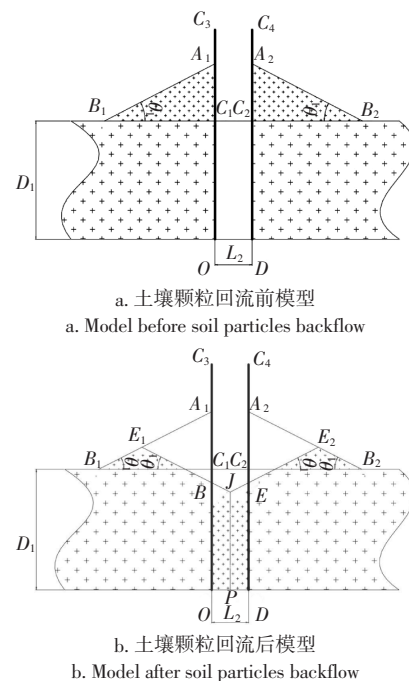
Note:  $H$  is tail height of soil backflow port, mm;  $\theta_2$  is soil backflow port angle,  $(^\circ)$ ;  $L_1$  is the bottom length of soil backflow port, mm;  $L_2$  is space between two wing plates, mm. Same as below.

图 2 甘草倾斜移栽开沟器参数

Fig.2 Parameters of licorice tilt transplanting furrow opener

#### 2.1.1 开沟器作业深度

在开沟器作业过程中,土壤颗粒经芯铧颊面和土壤分流板分开,按照土壤休止角堆放在开沟器翼板两侧。开沟器前进方向垂直截面壤回流前后土壤模型如图 3 所示。



注:截面  $\triangle A_1B_1C_1$ 、 $\triangle A_2B_2C_2$  所代表空间内为土壤回流前开沟器翼板两侧倾斜堆放土壤颗粒,  $\text{mm}^2$ ;  $OC_3$ 、 $DC_4$  为开沟器翼板高度, mm;  $OD$ 、 $C_1C_2$  为开沟器翼板宽度, mm;  $\theta_1$  为土壤休止角,  $(^\circ)$ ;  $D_1$  为开沟器作业深度, mm; 截面  $A_1E_1B_1$ 、 $A_2B_2E_2$  为回流土壤颗粒回流前位置,  $\text{mm}^2$ ; 五边形  $ODEJB$  内为回流内沟内土壤,  $\text{mm}^2$ 。

Note: Within the section  $\triangle A_1B_1C_1$ 、 $\triangle A_2B_2C_2$  are particles inclined stacking on both sides of opener wing plate before soil backflow,  $\text{mm}^2$ ;  $OC_3$  and  $DC_4$  are height of opener wing plate, mm;  $OD$  and  $C_1C_2$  are space between two wing plates, mm;  $\theta_1$  is soil repose angle,  $(^\circ)$ ;  $D_1$  is operating depth of furrower, mm;  $A_1E_1B_1$ 、 $A_2B_2E_2$  are position of backflow soil particles before backflow,  $\text{mm}^2$ ; within pentagon  $ODEJB$  is soil particles backflow into groove,  $\text{mm}^2$ .

图 3 土壤回流前后模型

Fig.3 Model before and after soil particles backflow

如图 3 所示,开沟器成型过程中体积守恒,即横截面积守恒,横截面内消失部分的面积和横截面内增加的面积相等,即

$$S_1=S_2+S_3=2S_2=2S_3 \quad (1)$$

式中  $S_1$  为截面四边形  $ODC_2C_1$  面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_2$  为截面  $\triangle A_1B_1C_1$  面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_3$  为截面  $\triangle A_2B_2C_2$  面积,  $\text{mm}^2$ ; 设图 3a 中  $B_1C_1=B_2C_2=x$ , 可得  $A_1C_1=A_2C_2=x\tan\theta_1$ , 即

$$D_1 \cdot L_2 = x^2 \tan\theta_1 \quad (2)$$

式中  $D_1$  为开沟器作业深度,  $\text{mm}$ ;  $L_2$  为开沟器翼板间距,  $\text{mm}$ ;  $\theta_1$  为土壤休止角,  $(^\circ)$ 。

当开沟器作业完成, 按照土壤休止角堆放于开沟器翼板两侧的土壤回流入开沟器开出的沟内, 开沟器前进方向垂直截面壤回流后土壤模型如图 3b 所示。根据横截面面积守恒, 即横截面内消失部分的面积和横截面内增加的面积相等, 即

$$S_4=S_5+S_6=2S_5=2S_6 \quad (3)$$

式中  $S_4$  为截面五边形  $ODEJB$  面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_5$  为截面  $\triangle A_1E_1B$  面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_6$  为截面  $\triangle A_2E_2E$  面积,  $\text{mm}^2$ 。

设图 3b 中,  $BC_1=EC_2=k$ , 则

$$D_1=OB+k \quad (4)$$

$$S_4=2 \times \left[ \frac{1}{2} (OB+JP) \cdot OP \right] \quad (5)$$

$$JP=OB-\frac{L_2 \tan\theta_1}{2} \quad (6)$$

$$S_5=\frac{(A_1B)^2}{2 \tan\theta_1}=\frac{(x \tan\theta_1+k)^2}{2 \tan\theta_1} \quad (7)$$

式中  $JP$  为  $J$  点与沟底平面垂直距离,  $\text{mm}$ ;  $OB$  为  $B$  点与沟底平面垂直距离,  $\text{mm}$ ;

将式(5)~式(7)代入式(3), 根据面积相等原则得

$$\left( 2OB-\frac{L_2 \cdot \tan\theta_1}{2} \right) L_2 = \frac{(x \tan\theta_1+k)^2}{2 \tan\theta_1} \quad (8)$$

将式(2)、式(8)联立方程组解得

$$D_1 = \frac{L_2 \left[ -\tan\theta_1 \pm \sqrt{\tan^2\theta_1 + \frac{4 \tan\theta_1}{L_2} \left( OB \pm 2 \left[ (2OB-d_1)d_1 \right]^{\frac{1}{2}} \right)} \right]}{4 \tan\theta_1} \quad (9)$$

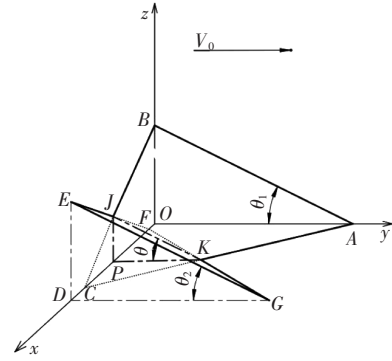
$$d_1 = \frac{L_2 \tan\theta_1}{2}$$

式中  $d_1$  为宽度, 为  $L_2$  的倾斜  $V$  型断面沟深度, 即  $JB$  之间垂直距离,  $\text{mm}$ 。

### 2.1.2 开沟器结构参数

为研究土壤回流过程中沟型的成型机理, 建立如图 4 空间坐标系, 开沟器前进方向为  $y$  轴, 竖直方向为  $z$  轴。开沟器回土瞬间倾斜  $V$  型断面沟两侧面为空间平面  $ABJK$  和空间平面  $JKGE$ , 沟底直线  $JK$  为两侧面的交线, 即为空间平面  $ABC$  与  $EFG$  的交线  $JK$ ,  $J, K$  两点分别为直线  $JK$  与  $xoz$  面和  $xoy$  面的交点,  $JK$  与  $xoy$  平面的夹角为倾斜  $V$  型断面沟的倾斜角度  $\theta$ 。如图 4 所示, 土壤从土壤回流口回流至沟内的过程中, 回流的土壤在内摩擦力作用下按照土壤休止角分布<sup>[26-28]</sup>, 直线  $BC$ 、直线  $EF$  与  $x$  轴的夹角为土壤休止角  $\theta_1$ 。

由图 4 几何关系可知:  $A$  点坐标为  $(0, OB/\tan\theta_2, 0)$ 、 $B$  点坐标为  $(0, 0, OB)$ 、 $C$  点坐标为  $(OB/\tan\theta_1, 0, 0)$ 、 $D$  点坐标为  $(L_2, 0, 0)$ 、 $E$  点坐标为  $(L_2, 0, OB)$ 、 $F$  点的坐标为  $(L_2-OB/\tan\theta_2, 0, 0)$ 、 $G$  点坐标为  $(L_2, OB/\tan\theta_2, 0)$ 。



注: 空间平面  $ABJK$  和空间平面  $JKGE$  为倾斜  $V$  型断面沟侧面;  $d_1$  为  $J$  与  $B$  两点之间垂直距离,  $\text{mm}$ 。

Note: Space plane  $ABJK$  and  $JKGE$  are inclined to side of inclined  $V$  type cross section groove;  $d_1$  is vertical distance between  $J$  and  $B$ ,  $\text{mm}$ .

图 4 土壤回流模型

Fig.4 Soil backflow model

利用三点法求解空间平面  $ABC$  和  $EFG$  的方程分别为式(10)、式(11)。

$$\tan\theta_1 x + \tan\theta_2 \left( y - \frac{OB}{\tan\theta_2} \right) + z = 0 \quad (10)$$

$$\tan\theta_1 (x - L_2) - \tan\theta_2 \left( y - \frac{OB}{\tan\theta_2} \right) - z = 0 \quad (11)$$

式中  $\theta_2$  为土壤回流口角度,  $(^\circ)$ 。

由式(10)、式(11)可求解两平面交线  $JK$  方程为

$$\begin{cases} x = \frac{L_2}{2} \\ y \tan\theta_2 + z - OB + \frac{L_2 \tan\theta_1}{2} = 0 \\ y \geq 0 \\ z \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

由空间直线  $JK$  方程(12)可知直线  $JK$  的方向向量

$$\vec{n}_1 = (0, \tan\theta_2, 1) \quad (13)$$

平面  $xoy$  的法相向量

$$\vec{n}_2 = (0, 0, 1) \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入空间直线  $JK$  与水平面夹角  $\theta$  的余弦公式, 可得

$$\cos\theta = \cos\theta_2 \quad (15)$$

即

$$\theta = \theta_2 \quad (16)$$

式中  $\theta$  为倾斜  $V$  型断面沟沟底倾斜角度,  $(^\circ)$ 。即倾斜  $V$  型断面沟沟底倾斜角度  $\theta$  等于开沟器土壤回流口角度  $\theta_2$ 。

由图 4 可知,  $J$  点位于  $xoz$  平面内, 由式(3)可确定  $J$  点坐标为  $(L_2/2, 0, OB - (L_2 \tan\theta_1)/2)$ , 即

$$JP = Z_{JP} = OB - \frac{L_2 \tan\theta_1}{2} \quad (17)$$

$$JK = \frac{JP}{\sin\theta_2} = \frac{2OB - L_2 \tan\theta_1}{2 \sin\theta_2} \quad (18)$$

式中  $JK$  为倾斜  $V$  型断面沟沟底长度,  $\text{mm}$ 。

联立式(9)、式(18)整理得

$$\begin{cases} \theta = \theta_2, \\ JK = \frac{(-4d_1 + \sqrt{12d_1^2 + 8d_1(D_1 + \sqrt{D_1 \tan \theta_1 L_2})})^2 - 4d_1^2}{8 \sin \theta_2 d_1}, \\ d_1 = \frac{L_2 \tan \theta_1}{2}. \end{cases} \quad (19)$$

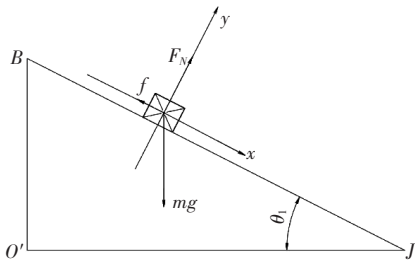
在开沟器土壤回流口尾部高度高于耕深的前提下,由式(9)、式(16)、式(17)、式(19)可得开沟器尺寸参数、工作参数的数学模型为

$$\begin{cases} \theta = \theta_2, \\ D_1 = \frac{L_2 \left[ -\tan \theta_1 \pm \sqrt{\tan^2 \theta_1 + \frac{4 \tan \theta_1}{L_2} (OB \pm 2[(2OB - d_1)d_1]^{\frac{1}{2}})} \right]^2}{4 \tan \theta_1}, \\ OB = \frac{2JK \sin \theta_2 + L_2 \tan \theta_1}{2}, \\ d_1 = \frac{L_2 \tan \theta_1}{2}. \end{cases} \quad (20)$$

基于上述分析可知,影响倾斜 V 型断面沟倾斜角度与沟底长度的因素有土壤休止角  $\theta_1$ 、土壤回流口角度  $\theta_2$ 、开沟器作业深度  $D_1$ 、开沟器翼板宽度  $L_2$ 、开沟器作业速度  $V_0$ ; 在确定的倾斜 V 型断面沟参数下秧苗移栽角度取决于滞后投苗系数  $\eta$ 。

### 2.2 开沟器投苗位置参数模型的建立

土壤回流过程中土壤颗粒按照自然休止角<sup>[26-28]</sup>沿倾斜 V 型断面沟 V 型侧面滑移回流进入沟内, V 型侧面上其中一颗土壤颗粒为研究对象,受力分析如图 5 所示。



注:  $BJ$  为滑落土坡长度, mm;  $f$  为摩擦力, N;  $mg$  为土壤颗粒的重力, N;  $F_N$  为土壤斜坡表面支撑力, N。

Note:  $BJ$  is length of slope, mm;  $f$  is friction force, N;  $mg$  is weight of soil particle, N;  $F_N$  is supporting force, N.

图 5 倾斜 V 型断面沟侧面

Fig.5 Inclined V type cross section groove side

按图 5 所示坐标,列平衡方程

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, m \cdot g \cdot \sin \theta_1 - f - m \cdot a_x = 0, \\ \sum F_y = 0, F_N - m \cdot g \cdot \cos \theta_1 = 0, \\ f = \mu \cdot F_N. \end{cases} \quad (21)$$

式中  $\sum F_x$  与  $\sum F_y$  分别为  $x$ 、 $y$  轴方向的合力, N;  $m$  为土壤颗粒的质量, g;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $a_x$  为  $x$  轴方向加速度,  $m/s^2$ ;  $F_N$  为土壤颗粒对倾斜 V 型断面沟侧边正压力, N;  $f$  为土壤倾斜 V 型断面沟侧边方向滑动摩擦力, N;  $\mu$  为土壤颗粒间动摩擦系数。

解得

$$a_x = g(\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \mu). \quad (22)$$

建立  $x$  方向运动方程

$$\begin{cases} \frac{1}{2} a_x t^2 = \frac{BJ}{1000}, \\ BJ = \frac{O'J}{\cos \theta_1}, \\ O'J = \frac{L_2}{2}. \end{cases} \quad (23)$$

式中  $t$  为土壤颗粒滚落时间, s;  $O'J$  为倾斜 V 型断面沟侧边水平宽度, mm;  $BJ$  为倾斜 V 型断面沟侧边截面长度, mm。

解方程组得

$$t = \sqrt{\frac{L_2}{500 g \cos \theta_1 (\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \mu)}}. \quad (24)$$

在开沟器工作过程中,倾斜 V 型断面沟 V 型侧面形成时间内开沟器前进距离为倾斜 V 行断面沟形成滞后距离

$$S = \frac{2500V_0 t}{9}. \quad (25)$$

式中  $S$  为倾斜 V 型断面沟形成滞后距离, mm;  $V_0$  为开沟器前进速度, km/h。

由式(23)、式(24)得

$$S = \frac{250V_0}{9} \sqrt{\frac{L_2}{5 g \cos \theta_1 (\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \mu)}}. \quad (26)$$

如图 1 所示,在实际作业过程中,为保证甘草苗能够准确的落在倾斜沟底  $JK$  上,须滞后投苗,选取投苗过程秧苗滞后投苗距离  $S_1$  与倾斜 V 型断面沟 V 型侧面形成滞后距离的比值为滞后投苗系数:

$$\eta = \frac{S_1}{S} = \frac{9S_1 \sqrt{5gL_2 \cos \theta_1 (\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \mu)}}{250V_0 L_2}. \quad (27)$$

式中  $S_1$  为甘草苗滞后投苗距离(甘草苗头部(芽端)与回流土壤与开沟器翼板相交的末端点  $E$  间距), mm。

## 3 试验与分析

为检验开沟器的工作性能,探明各因素对开沟性能的影响规律,优化设计参数,进行了相关试验研究。

### 3.1 试验设备与条件

试验在中国农业大学工学院机器-土壤-植物重点实验室土槽试验台上进行(如图 6 所示)。试验用土壤湿度为 11.3%、16.7%、22.5%,用旋耕机旋 3 遍,通过五点法在土槽试验区开始、中间、尾部 3 处选取土壤。通过堆积角的方法测得 3 种含水率的土壤休止角分别为 22.4°、29.6°、36.8°,滑动摩擦系数为 0.2。



图 6 土槽试验

Fig.6 Soil bin test

### 3.2 开沟器成型试验

#### 3.2.1 试验因素水平的确定

基于前述理论分析,确定影响倾斜 V 型断面沟倾斜

角度  $\theta$  和沟底长度  $JK$  的因素水平见表 1, 试验选用五因素三水平正交表。

表 1 正交试验因素水平  
Table 1 Orthogonal factor levels

水平 Levels	土壤休止角 Soil repose angle $A/(^\circ)$	土壤回流口 角度 Soil backflow port angle $B/(^\circ)$	开沟器前进 速度 Furrow opener speed $C/(km \cdot h^{-1})$	开沟器耕深 Furrow opener operating depth $D/mm$	开沟器翼板 宽度 Space between two wing plates $E/mm$
1	22.4	25	0.5	100	40
2	29.6	30	1	150	60
3	36.8	35	1.5	200	80

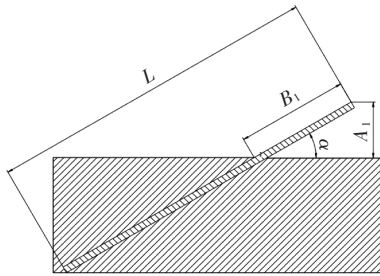
### 3.2.2 试验指标的确定

在测取倾斜  $V$  型断面沟沟底角度和长度参数时, 开沟器连续工作, 形成的倾斜  $V$  型断面沟会被新流入沟内的土壤覆盖, 导致较难实时测定倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度和沟底长度参数。为解决这一问题, 在测量时, 选取若干根 400 mm 的长直杆等效测定倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度和沟底长度参数, 在开沟器作业时, 运用人工将长直杆铺放于倾斜土坡上, 待完成开沟器作业之后, 埋于土壤内部的长直杆的长度和长直杆的倾斜角度即为投放长杆瞬时倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度  $\theta$  和沟底长度  $JK$ , 参见图 7, 即

$$JK=L-B_1, \quad (28)$$

$$\theta=\alpha=\sin^{-1}\frac{A_1}{B_1}。 \quad (29)$$

式中  $L$  为试验测量用长直杆的总长, mm;  $B_1$  为裸露于土壤外部直杆长度, mm;  $A_1$  为长直杆尾部与土壤颗粒回流后沟底的垂直距离, mm;  $\alpha$  为长直杆倾斜角度, ( $^\circ$ )。



注:  $L$  为测量用直杆长度, mm;  $B_1$  为裸露于土壤外部直杆长度, mm;  $A_1$  为长直杆尾部与土壤颗粒回流后沟底的垂直距离, mm;  $\alpha$  为长直杆倾斜角度, ( $^\circ$ )。

Note:  $L$  is length of straight bar, mm;  $B_1$  is length of straight bar uncovered by soil, mm;  $A_1$  is vertical dimension between straight bar tail and bottom of trench after soil particles reflow, mm;  $\alpha$  is angle of straight bar, ( $^\circ$ )。

图 7 试验测量参数

Fig.7 Experimental measurement parameters

### 3.3 开沟器投苗滞后系数试验

试验用一年生甘草根茎秧苗经选苗处理后长度约 300 mm, 试验过程中甘草根茎秧苗倾斜移栽角度为  $30^{\circ}$ 。由于甘草根茎质地柔软、茎秆弯曲, 为方便测取相关参数, 选用 300 mm 长锥形杆进行甘草根茎秧苗滞后投苗试验。选取倾斜  $V$  型断面沟角度  $30^\circ$ 、倾斜  $V$  型断面沟长度 300 mm、开沟器翼板宽度 60 mm、土壤自然休止角为  $22.4^\circ$ 、 $29.6^\circ$ 、 $36.8^\circ$ , 通过开沟器尺寸参数获取公式加工开沟器, 土壤回流口角度  $\theta_2$  为  $30^\circ$ , 开沟器翼板宽度来  $L_2$  为 60 mm, 通过开沟器工作参数获取公式获得 3 个开沟器作业深度参数

$D_1$  分别为 178、188、199 mm。

试验过程中开沟器的速度选取为 0.5、0.75、1.0、1.25、1.5 km/h。试验过程中在 5 种速度参数下, 投苗滞后参数  $\eta$  分别选取 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5。

### 3.4 试验结果分析

在开沟器进行正交试验作业过程中, 试验效果如图 8 所示, 测量倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度  $\theta$  和沟底长度  $JK$  的值并进行统计记录分析, 试验结果见表 2。



图 8 试验结果

Fig.8 Test results

由表 2 可知, 影响倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度  $\theta$  的因素水平主次顺序为开沟器切角、开沟器翼板间距、土壤休止角、开沟器前进速度、开沟器耕深。开沟器翼板间距、土壤休止角、开沟器速度、开沟器作业深度的极差值仅为开沟器土壤回流口夹角极差值的 3.51%、2.69%、1.65%、0.52%, 因此可忽略这 4 个影响因素对倾斜角度的影响, 确定开沟器土壤回流口夹角为倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度的主要因素。

表 2 正交试验法各序号所对应的倾斜  $V$  型断面沟长度以及正交直观分析法所得结果中可以看出, 影响倾斜  $V$  型断面沟长度的因素按影响主次分别为开沟器作业深度、开沟器切角、开沟器翼板间距、土壤休止角、开沟器前进速度。

为验证开沟器尺寸参数、工作参数的数学模型(27)的准确性, 将各组参数输入验证式(19)得出验证参数  $\theta'$  和  $JK'$ , 通过计算验证参数和实际测量值之间的误差, 即

$$\begin{cases} \eta_\theta = \frac{(\theta' - \theta'')}{\theta''} \times 100\%, \\ \eta_{JK} = \frac{(JK' - JK'')}{JK''} \times 100\%. \end{cases} \quad (30)$$

式中  $\eta_\theta$  为倾斜  $V$  型断面沟角度误差;  $\eta_{JK}$  为倾斜  $V$  型断面沟长度误差;  $\theta''$  为试验测得倾斜  $V$  型断面沟角度, ( $^\circ$ );  $\theta'$  为式(19)得倾斜  $V$  型断面沟角度验证参数, ( $^\circ$ );  $JK''$  为试验测得倾斜  $V$  型断面沟长度, mm;  $JK'$  为式(19)得倾斜  $V$  型断面沟长度验证参数, mm。

通过计算, 得出各序号对应的倾斜  $V$  型断面沟角度误差和长度误差, 其结果如图 9 所示, 倾斜  $V$  型断面沟角度误差和长度误差均在  $\pm 4\%$  范围之内, 说明式(19)能够真实反应试验过程中相关参数对倾斜  $V$  型断面沟角度和倾斜  $V$  型断面沟长度两参数的影响。由此可知, 开沟器尺寸设计参数、工作参数获取式(27)能够用来获取开沟器的设计的相关参数, 实现特定角度, 特定长度倾斜  $V$  型断面沟。

表 2 试验结果分析

Table 2 Direct-viewing analysis of result

试验次数 Test times	土壤休止角 Soil repose angle <i>A</i>	土壤回流口夹角 Soil backflow port angle <i>B</i>	开沟器前进 速度 Furrow opener speed <i>C</i>	开沟器作业深度 Furrow opener operating depth <i>D</i>	开沟器翼板宽度 Space between two wing plates <i>E</i>	倾斜 V 型断面沟角度 Angel of inclined V type cross section groove $\theta/(\circ)$	倾斜 V 型断面沟长度 length of inclined V type cross section groove <i>JK/mm</i>
1	1	1	1	1	1	24.6	155
2	1	2	2	2	2	29.8	195
3	1	3	3	3	3	34.2	225
4	2	1	1	2	2	24.8	212
5	2	2	2	3	3	29.6	240
6	2	3	3	1	1	34.3	105
7	3	1	2	1	3	24.9	85
8	3	2	3	2	1	30.1	185
9	3	3	1	3	2	34.8	205
10	1	1	3	3	2	24.6	330
11	1	2	1	1	3	29.4	105
12	1	3	2	2	1	34.5	185
13	2	1	2	3	1	24.9	330
14	2	2	3	1	2	30.2	100
15	2	3	1	2	3	34	140
16	3	1	3	2	3	24.6	170
17	3	2	1	3	1	29.7	285
18	3	3	2	1	2	34.55	85
倾斜 V 型 断面沟角 度 Angel of inclined V type cross section groove $\theta$	$k_1$	29.52	24.73	29.55	29.68	29.68	
	$k_2$	29.63	29.8	29.71	29.63	29.79	
	$k_3$	29.78	34.39	29.67	29.63	29.45	
	极差 Range	0.26	9.66	0.16	0.05	0.34	
	因素主次 Primary and secondary factors	$B>E>A>C>D$					
倾斜 V 型 断面沟长 度 Ditch length of inclined V type cross section groove <i>JK</i>	$k_1$	199.17	213.67	180.33	105	204.17	
	$k_2$	187.83	181.67	185.83	181.17	187	
	$k_3$	165	156.67	185.83	265.83	160.83	
	极差 Range	34.17	57	5.5	160.83	43.34	
	因素主次 Primary and secondary factors	$D>B>E>A>C$					

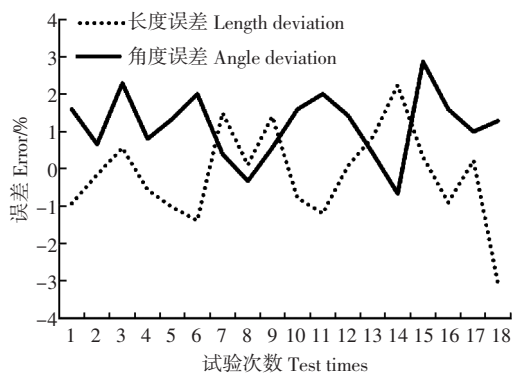


图 9 沟型参数误差折线图

Fig.9 Error line chart of groove parameters

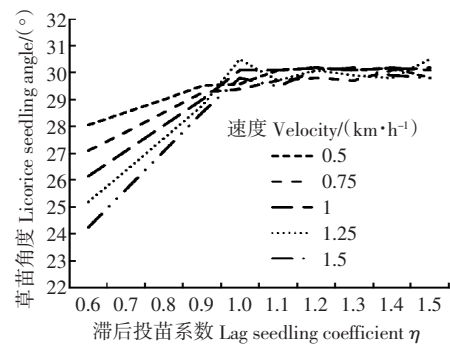


图 10 甘草苗角度误差折线图

Fig.10 Error line chart of licorice seedling angle

通过试验获得不同速度、不同投苗滞后系数情况下甘草苗的角度,如图 10 所示。由图 10 可知,当滞后投苗系数  $\eta < 1$  时,甘草秧苗的角度随滞后投苗系数  $\eta$  值的减小而减小,随开沟器速度的增大而减小,当滞后投苗系数  $\eta \geq 1$ ,甘草秧苗的倾斜角度在  $28^\circ \sim 31^\circ$  之间稳定波动。

#### 4 结 论

1)提出了以开沟器控制土壤回流实现甘草秧苗的倾斜移栽的方式,设计了一种甘草倾斜移栽用开沟器,将甘草秧苗放置于开沟器作业后形成倾斜 V 型断面沟上,实现甘草秧苗的倾斜移栽。

2)建立开沟器作业机理的数学模型,确定开沟器作业

过程的影响参数, 倾斜  $V$  型断面沟倾斜角度和长度的理论计算和试验结果误差均在 $\pm 4\%$ 范围之内。该数学模型为实现特定倾斜角度、长度的倾斜  $V$  型断面沟设计提供了理论依据。

3) 在倾斜移栽角度  $30^\circ$  农艺条件下, 当滞后投苗系数小于 1 时, 甘草秧苗的角度随滞后投苗系数的减小而减小, 随开沟器速度的增大而减小; 当滞后投苗系数大于等于 1 时, 甘草秧苗的倾斜角度在  $28^\circ \sim 31^\circ$  之间波动, 能够实现甘草苗的稳定倾斜移栽。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王晓荣. 榆林地区甘草资源的开发与利用[J]. 资源开发与市场, 2003, 19(6): 21-23.  
Wang Xiaorong. Exploitation and utilization of licorice resources in Yulin region[J]. Resource Development & Market, 2003, 19(6): 21-23.(in Chinese with English abstract)
- [2] 张治科, 南宁丽, 张蓉, 等. 野生和人工种植甘草害虫天敌资源、群落特征及种群动态研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 161-166.  
Zhang Zhike, Nan Ningli, Zhang Rong, et al. Resources community characteristics and dynamics of natural enemies in wild and artificial field of glycyrrhiza uralensis[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2009, 37(1): 161-166.(in Chinese with English abstract)
- [3] 代少山. 乌拉尔甘草种质资源与药材质量研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.  
Dai Shaoshan. Study on Germplasm Resource Evaluation and Medicinal Quality Research of Glycyrrhiza Uralensis F[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.(in Chinese with English abstract)
- [4] 安金翠. 乌拉尔甘草种质资源的评价与分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.  
An Jincui. Evaluation and Analysis on Germplasm Resources of Glycyrrhiza Uralensis Fisch[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009.(in Chinese with English abstract)
- [5] 韦利波, 王维新, 闫琴. 甘草移栽机的设计与运动分析[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(03): 367-369.  
Wei Libo, Wang Weixin, Yan Qin. Design and Motion analysis of licorice transplanter[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science Edition, 2011, 29(03): 367-369.(in Chinese with English abstract)
- [6] 闫洪余, 都基建, 陈立刚, 等. 2ZG-2 型甘草类移栽机的设计[J]. 农机使用与维修, 2011(6): 43-45.  
Yan Hongyu, Du Jijian, Chen Ligang, et al. Design of the transplanting machine of licorice[J]. Agricultural Use and Maintenance Machinery, 2011(6): 43-45.(in Chinese with English abstract)
- [7] Lungkapin L J, Salokhe V M, Kalsirisilp R, et al. Design and development of a cassava planter[J]. Transactions of The ASAE, 2009, 52(2): 393-399
- [8] Chen L H, Younis T S, Allison M. Horizontal transplanting of sweet potatoes[J]. Ama-Agricultural Mechanization in Asia Africa Transactions of the ASAE, 1982, 26(7): 1524-1528
- [9] Dooley H. Transplanter for forest nurseries[J]. Transactions of The ASAE, 1983, 25(7): 1661-1664
- [10] 王石, 王笑岩, 李成华. 挠性圆盘式蔬菜移栽机运动仿真分析[J]. 农机化研究, 2013(10): 42-45.  
Wang Shi, Wang Xiaoyan, Li Chenghua. Analysis of kinematic simulation of soft disc-type vegetable seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(10): 42-45.(in Chinese with English abstract)
- [11] 金诚谦, 吴崇友, 袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 196-198.  
Jin Chengqian, Wu Chongyou, Yuan Wensheng. Analysis on factors affecting the quality of the transplanting machine of the chain clip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 196-198.(in Chinese with English abstract)
- [12] 于修刚. 链夹式稻板田油菜栽植系统的分析与优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.  
Yu Xiugang. The Analysis and Optimization of the Clip-Chain Transplanter for Rapeseed in Paddy Field[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.(in Chinese with English abstract)
- [13] 李振. 链夹式大葱移栽机的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.  
Li Zhen. The Development of The Chain Clamp Type Spring Onion Transplanting Machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.(in Chinese with English abstract)
- [14] Hamid A, Ahmad D, Rukunuddin I H. Performance of sweet potato transplanting machine on mineral and bris soils[J]. Ama-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2010, 41(1): 55-59.
- [15] 廖结安, 刘新英, 张洪洲, 等. 红枣树苗移栽机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2014(3): 109-112.  
Liao Jie'an, Liu Xinying, Zhang Hongzhou, et al. Redjujube seedling transplanting machine design and test[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(3): 109-112.(in Chinese with English abstract)
- [16] 马程宏, 李南, 李涛, 等. 钵体苗带式供苗移栽机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 216-222.  
Ma Zenghong, Li Nan, Li Tao, et al. Design and experiments on a transplanter with belt feeding on block seeding[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3): 216-222.(in Chinese with English abstract)
- [17] 严宵月, 胡建平, 吴福华, 等. 整排取苗间隔放苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 7-13.  
Yan Xiaoyue, Hu Jianping, Wu Fuhua, et al. Design and experiment of full-row-pick-up and single-dropping seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 7-13.(in Chinese with English abstract)
- [18] 杨帅, 宋建农, 王继承, 等. 洋葱移栽机夹苗机构的设计与运动仿真[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 133-137.  
Yang Shuai, Song Jiannong, Wang Jicheng, et al. Design and kinematic simulation of clip seedling mechanism for an onion seedling transplanter[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(5): 133-137.(in Chinese with English abstract)
- [19] 童俊华, 蒋焕煜, 蒋卓华, 等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 8-16.  
Tong Junhua, Jiang Huanyu, Jiang Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 8-16.(in Chinese with English abstract)
- [20] 金诚谦, 吴崇友, 袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 196-198.  
Jin Chengqian, Wu Chongyou, Yuan Wensheng. Analysis on factors affecting the quality of the transplanting machine of the chain clip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 196-198.(in Chinese with English abstract)
- [21] 王彩贤. 甘薯苗开穴注水移栽机的研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2014(04): 17-21.  
Wang Caixian. Development and experiments of opening hole-

- watering injection transplanting machine for sweet potato seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014(04): 17–21.(in Chinese with English abstract)
- [22] 苟文, 马荣朝, 杨文钰, 等. 小麦免耕播种机开沟器的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 21–25.  
Gou Wen, Ma Rongchao, Yang Wenyu, et al. Design of opener on no-till wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 21–25.(in Chinese with English abstract)
- [23] 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]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 83–88.  
Zhuang Jian, Jia Honglei, Ma Yunhai, et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 83–88.(in Chinese with English abstract)
- [24] 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38–42.(in Chinese with English abstract)
- [25] 李辉, 吴建民, 孙伟. 垂直分层种施开沟器的设计与试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(2): 143–146.  
Li Hui, Wu Jianmin, Sun Wei. Experimental study and design on furrow opener of vertical stratified application of fertilizer and seed[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(2): 143–146.(in Chinese with English abstract)
- [26] 岳高伟, 贾慧娜. 稳定流场条件下土壤颗粒跃移运动的力学特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 74–81.  
Yue Gaowei, Jia Huina. Mechanical properties of saltating soil particles in steady-state wind field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(23): 74–81.(in Chinese with English abstract)
- [27] 赵爱辉, 黄明斌, 史竹叶. 土壤颗粒分布参数模型对黄土性土壤的适应性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 1–6.  
Zhao Aihui, Huang Mingbin, Shi Zhuye. Evaluation of parameter models for estimating loess soil particle-size distribution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 1–6.(in Chinese with English abstract)
- [28] 佟金, 任露泉, 陈秉聪, 等. 土壤颗粒尺寸分布分维及对粘附行为的影响[J]. 农业工程学报, 1994, 10(3): 27–33.  
Tong Jin, Ren Luquan, Chen Bingcong, et al. Fractal dimensions of soil particle-size distributions and their effects on soil adhesion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1994, 10(3): 27–33.(in Chinese with English abstract)

## Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener

Wang Xujian, Song Jiannong\*, Liu Cailing, Dong Xiangqian, Wang Jicheng, Zhang Chao

(Key Laboratory of Soil-Machine-Plant Systematic Technology, Ministry of Agriculture, College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Licorice is not only an important Chinese herbal medicine, but also widely used as an additive in food industry. With the increasing demand of licorice, wild licorice resources can not meet the needs of the market. Artificial cultivation of licorice has become an effective way to solve the problem between the supply and demand of licorice resources. Direct seeding method leads to dredge difficult and large labor consumption when harvest because of its low seedling survival rate, large quantity, long growth cycle, and deep roots. Research shows that seedling transplanting can be used for licorice planting. By this way, the licorice roots can grow strongly and healthily with good quality and high yield; and it is also easy for mechanized harvesting. Seedling transplanting is an ideal cultivation model for artificial cultivation of licorice. At present, the cultivation of licorice in China is still in the manual operation stage, from which exist many problems, such as large labor input, high cost, low production efficiency, poor transplanting quality, etc. Due to the impact of the above problems, the scale of the cultivation of artificial transplanting of licorice has been greatly restricted. A lot of relevant research documents show that the development trend of the cultivation of licorice is the mechanization of transplanting. However, the research on the transplanting machine of licorice in China is still in its early stage, and there is no mature and practical application of the licorice root transplanting machine. In this paper a licorice tilt transplanting opener was proposed. The analysis and experiment of the structure and work parameters of the opener were carried out, which provided the research foundation for the design of the licorice transplanting machine. In order to analyze the forming mechanism of the tilt transplanting furrow opener, the soil backflow model and seedling position parameter model were built. Through analyzing results of the mathematical model, a multi-factors orthogonal test for the opener was executed by changing the soil backflow port angle, the space between two wing plates, velocity, the furrower operating depth and the soil repose angle. The opener orthogonal test results showed that main influencing factors of the inclined V type groove tilt angle was the soil backflow port angle. The primary and secondary order of the factors affecting the length of the ditch was: the furrow opener operating depth, the soil backflow port angle, the space between two wing plates, the soil repose angle and the velocity. The results also showed that the formula built by mathematical model could be used for design the opener to make V type inclined groove. Under the agronomic condition of 30° inclined transplanting with 300 mm long licorice roots. When the lag seedling coefficient value less than 1, the licorice angle decreased with the lag seedling coefficient value decreased, and decreased with the increase of the opener velocity. When the lag seedling coefficient value was equal or greater than 1, the licorice angle fluctuated between 28°–31°. The opener had the advantages of stable working performance.

**Keywords:** agricultural machinery; design; models; licorice; tilt transplanting; furrow opener