

## 油菜割晒机拨指输送链式输送装置研制与试验

金诚谦<sup>1,2</sup>, 尹文庆<sup>1\*</sup>, 吴崇友<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘要:** 为了解决油菜割晒作业输送铺放难题, 研制了油菜割晒机拨指输送链式输送装置, 可以实现油菜割晒输送、铺放作业。该研究对拨指输送链式输送装置进行了结构设计, 在排禾口处, 在保证拨指运动不干涉的条件下, 控制拨指回缩的轨道应尽量前伸, 以保证在排禾口处拨指一直对油菜茎秆有拨动输送作用。在分析拨禾轮对油菜植株作用过程以及对已割油菜茎秆推送作用的基础上, 给出了油菜割晒作业顺利输送时输送装置、拨禾轮、割刀三者之间水平与垂直安装距离以及输送装置安装倾角。拨禾轮中心与割刀的水平距离调节范围应为 0~276 mm, 割刀和输送装置前端之间的水平距离应根据油菜茎秆高度而定, 一般不超过 300 mm。拨禾轮中心的高度应大于 1 100 mm, 高度可调。输送装置前端与割刀的垂直距离应小于 125 mm。输送装置安装倾角 10°~20°。分析了拨指运动轨迹方程, 对输送带上油菜茎秆进行了受力分析。给出了油菜茎秆顺利输送铺放时机器前进速度、输送带速度、拨禾轮转速之间的相互关系。拨禾轮圆周线速度与机器前进速度的比值控制在 1.1~1.5, 输送带速度与前进速度的比值控制在 3.2~5.0。田间试验表明, 该输送铺放装置性能稳定, 作业顺畅, 油菜割晒作业总损失率 ≤0.85%, 油菜茎秆铺放角 ≤32°, 铺放角度差 ≤25°, 铺放质量达到要求。

**关键词:** 农业机械, 输送, 收获, 割晒机, 铺放, 油菜

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.002

中图分类号: S2252<sup>+</sup>1; S565.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0011-08

金诚谦, 尹文庆, 吴崇友. 油菜割晒机拨指输送链式输送装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 11-18.

Jin Chengqian, Yin Wenqing, Wu Chongyou. Development and experiment of rape windrower transportation device with poke finger conveyor chain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 11-18. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

中国油菜常年种植面积平均 737 万  $\text{hm}^2$ , 总产 1300 多 t, 单产 1700  $\text{kg}/\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。但 2012 年全国油菜机械化收获水平仅为 13.3%, 机械化水平低成为制约油菜产业发展的重要瓶颈。收获作业是油菜生产过程中用工多、劳动强度大的重要环节。油菜分段收获适应性强、适收期长, 有利于提高单机收获作业量<sup>[2-4]</sup>, 增加作业收入; 分段收获在割晒时的额外损失可以被其潜在的产量所补偿, 从而总的损失少, 产量较高<sup>[5]</sup>, 因而油菜分段收获具有广泛的市场。但中国油菜分段收获所需的油菜割晒机缺乏, 针对中国油菜种植制度现状和油菜割晒作业的技术要求, 有效解决油菜割晒作业过程中输送、铺放问题, 是油菜割晒机设计的重点与难点。

目前, 国内油菜割晒机的输送铺放装置型式如下: 一是橡胶输送带的结构形式, 为了增加输送能力, 有的在输送带上安装输送扒指, 有的在输送带上增加凸起的加强筋, 如曹震等设计的 4SY-1.8 型油菜割晒机<sup>[6-7]</sup>, 张连奇设计的手扶油菜割晒机<sup>[8]</sup>上均采用橡胶输送带的结构型式。由于油菜秸秆质量大, 割晒作业时含水量高, 所以油菜割晒机作业过程中输送能力不足, 容易造成排禾口堵塞, 铺放不整齐。另一种是在油菜割晒机排禾口处安装横向拨动机构和纵向拨动机构, 如金诚谦等研制的 4SY-2 型油菜割晒机<sup>[9]</sup>。但机构复杂, 造成整机结构、传动复杂, 质量大<sup>[6-14]</sup>。

在国外, 油菜实行分段收获的国家都是采用大型自走式专用割晒机实现油菜割晒作业。在输送系统上, 采用抗穿刺和耐撕裂的 V 型带做为输送带。为了保证作物的流动性和铺条的形状, 采用特大铺条开口, 外加后面割台面板的“后退设计”, 增加带的深度和增加拖拉机地隙来实现作物更好的铺放<sup>[15-20]</sup>。这些输送铺放装置适合于大

收稿日期: 2013-06-29 修订日期: 2013-09-29

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B02); 国家科技支撑计划资助项目(2010BAD01B06); 油菜现代产业技术体系建设项目(nycytx-00519)

作者简介: 金诚谦(1973-), 男, 安徽潜山人, 研究员, 博士生, 主要从事农业装备关键技术的基础理论与产品开发研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。Email: 412114402@qq.com。

\*通信作者: 尹文庆(1959-), 男, 湖北洪湖人, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业机械设计及理论与教学研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。

面积的直播油菜割晒作业，对中国小面积移栽油菜适应性差。

本文对油菜割晒机拨指输送链式输送装置的结构进行设计；分析了拨禾轮对油菜植株作用过程以及对已割油菜茎秆推送作用过程，给出了输送装置、拨禾轮、割刀三者之间水平与垂直安装距离以及输送装置安装倾角与推送角之间关系；分析了拨指运动轨迹方程，输送带上油菜茎秆的受力，给出了机器前进速度、输送带速度、拨禾轮转速之间的相互关系，以为油菜割晒机研制提供参考。

## 1 油菜基本特性

油菜基本特性是设计油菜割晒机输送铺放装置的基础，选择宁杂 11 号移栽油菜，随机选取 10 株油菜植株，对与割晒作业相关的油菜生物学特征进行了测量，如表 1。由表 1 可知移栽油菜因其植株高大，分枝多，冠层直径大，分枝相互交错，给油菜割晒作业输送铺放带来困难。

表 1 油菜基本特性参数值

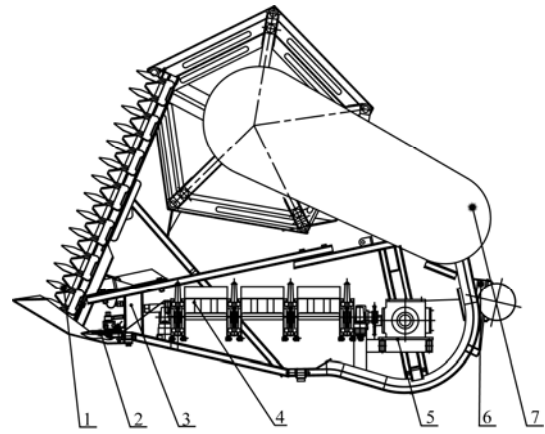
Table 1 Rape characteristics in experiment

参数Parameters	数值Values
株高Plant height/cm	172.1
主茎秆直径Main stem diameter/mm	14.7
油菜植株一次分枝数First branch number/个	10.0
一次分枝离地高度First branch height/cm	20.7
最大冠层直径 Largest canopy diameter/cm	121.1
最大冠层离地高度Largest canopy height/cm	130.2
单株生产力Productivity per plant/g	50.98
产量Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2170
茎秆含水率Stem moisture content/%	65.8
籽粒含水率Grain moisture content/%	21.3

## 2 油菜割晒机结构和工作原理

油菜割晒机总体设计如图 1 所示，主要由拨禾轮部件、水平割刀、竖割刀、机架部件、动力传动部件、输送部件、接口部件组成，整机通过接口部件与联合收获机底盘挂接。

作业时，动力由联合收获机动力输出，经摆环传动机构驱动水平割刀做水平往复运动，驱动竖割刀做竖直往复运动。另一方面，动力输出通过动力传动部件驱动输送部件运动。联合收获机底盘带动割晒机在田间行进，割晒机前方的油菜被水平割刀切割，在竖割刀的作用下，将收割区与待割区的分枝切断，达到分禾的目的。在拨禾轮的作用下，已割的油菜与未割的油菜分离，同时将已割的油菜推向拨指输送链式输送装置，在输送装置的作用下，油菜被成条鱼鳞状铺放于田间。



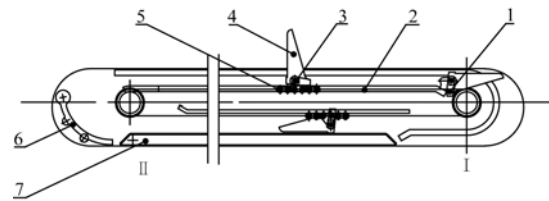
1. 竖割刀 2. 水平割刀 3. 机架部件 4. 输送部件 5. 动力传动部件 6. 接口部件 7. 拨禾轮部件  
1. Vertical cutter 2. Level cutter 3. Machine frame 4. Transportation device 5. Driveline component 6. Interface component 7. Reel device  
图 1 油菜割晒机结构图

Fig.1 Structure of rape windrower

## 3 拨指输送链式输送装置结构设计

### 3.1 结构和工作原理

拨指输送链式输送装置由 4 条回转的拨指输送链组成，如图 2 所示，拨指输送链由链条、拨指、链盒、导轨、挡块组成。拨指输送链安装在链盒中回转，铰接在链条上的拨指受链盒内导轨的控制，可以伸出和缩进。作业时，轴 II 上的链轮带动链条 5 转动，在链条上间隔分布着拨指 4，通过销轴 3 与链条 5 活动连接，拨指 4 可以绕销轴 3 转动，随着轴 II 转动，链条 5 自右向左运动，当拨指 4 的末端 1 碰到导轨 2 时，拨指 4 伸出，在轨道的作用下，保持伸出状态，倒向输送部件的油菜在伸出拨指的作用下向排禾口输送。当拨指 4 运动到左边时，脱离轨道，碰到挡块 6，实现回缩，完成油菜茎秆铺放。在底板 7 的作用下，拨指 4 保持回缩状态。



1. 拨指末端 2. 导轨 3. 销轴 4. 拨指 5. 链条 6. 挡块 7. 底板  
1. End of poke figer 2. Guide 3. Pin 4. Poke figer 5. Chain 6. Limit stop 7. Floor  
注：I、II 代表输送带传动轴。

Note: I, II represent conveyor belt transmission shaft.

图 2 输送带结构图

Fig.2 Structure of conveyor chain

### 3.2 排禾口结构设计

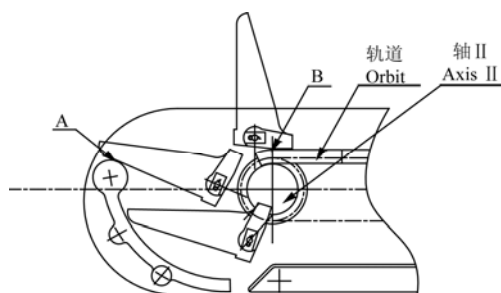
油菜茎秆在输送链的作用下，随拨指向排禾口运动，在排禾口处，拨指回缩，油菜茎秆的输送速度逐渐减为零，拨指回缩过早，油菜茎秆输送速度减为零时，如果油菜茎秆还没脱离输送带，堆积在

输送带末端的油菜茎秆必须靠后继的油菜茎秆将其推离输送带，会引起排禾口堵塞，在铺放效果上，会引起铺放成堆现象。所以，在结构允许的条件下，拨指应推迟回缩，将油菜茎秆推离输送带。

如图 3 所示，为保证拨指能顺利伸缩，在结构上应满足以下关系

$$R_1^2 \geq L_1^2 + \left(\frac{Z_1 p}{2\pi}\right)^2 \quad (1)$$

式中， $R_1$  为轴 II 中心到挡块端点 A 的距离，mm； $L_1$  为拨指长度，mm； $Z_1$  为轴 II 上链轮齿数， $p$  为轴 II 上链轮节距，mm；



注：A 点为挡块上端点，B 点为轴 II 上端点。  
Note: Point A is upper endpoint of limit stop, point B is upper endpoint of axis II.

图 3 排禾口结构示意图  
Fig.3 Structure of outlet

由于拨指的回缩受轨道控制，所以，在保证拨指碰到挡块回缩不干涉的条件下，轨道应尽量前伸，轨道最短应达到 B 点，与链轮轴中心线在一条线上，这样才能保证拨指回缩到链盒内之前一直对油菜茎秆有拨动输送作用。另外，应保持排禾口顺畅。

## 4 输送装置、拨禾轮、割刀相互位置关系

### 4.1 输送装置、拨禾轮、割刀的水平距离

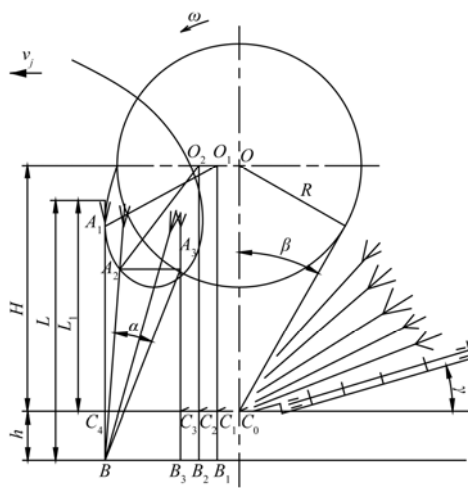
由于油菜冠层直径达到 0.46~1.35 m，在油菜割晒作业时，拨禾板不仅对直接相接触的油菜茎秆起压斜作用，而且还把这种作用继续传播到相邻的一组油菜茎秆上。

如图 4 所示，设任一拨禾板从  $A_1$  处插入油菜茎秆，直接作用在茎秆  $BA_1$  上，把它压斜，并压缩与它相邻的一组茎秆。当拨禾板沿余摆线圆弧从  $A_1$  移到  $A_2$  的过程中，由于油菜茎秆冠层直径比较大，油菜茎秆相互交织，因此这种压缩波便传播到茎秆  $B_3A_3$  上，引起角度为  $\alpha$  的区域内油菜茎秆的振动和倾斜，油菜茎秆的振动会引起油菜角果层脱落，引起割晒作业落粒损失，油菜茎秆倾斜，会引起油菜茎秆在输送台堆积，输送不整齐。割刀安装在输送装置前端，在拨禾轮和输送装置、割刀的水平安装距离上，割刀须提前，在油菜茎秆压缩波传递的时

候，将油菜茎秆割倒，减少落粒损失，使油菜茎秆提前倒向割台，铺放整齐，有利于输送<sup>[21-23]</sup>。在图 4 中，割刀相对于拨禾轮正常安装条件下，当拨禾轮轴到  $O_1$  点时，割刀在  $C_1$  点，割刀相对于拨禾轮最大提前量可以到  $C_4$  点<sup>[24]</sup>。所以， $0 \leq b \leq B_1B$  即

$$0 \leq b \leq \frac{R}{\lambda} \sqrt{\lambda^2 - 1} \quad (2)$$

式中， $b$  为割刀相对于拨禾轮轴水平安装距离，mm； $R$  为拨禾轮半径，mm； $\lambda$  为拨禾速度比。



注： $\omega$  为拨禾轮角速度，rad/s； $v_f$  为机器前进速度，m/s； $H$  为拨禾轮中心离割刀高度，mm； $h$  为割刀离地高度，mm； $L$  为油菜生长高度，mm； $L_1$  为割下油菜茎秆长度，mm； $R$  为拨禾轮半径，mm； $\alpha$  为油菜茎秆压缩波传递角度， $^\circ$ ； $\beta$  为拨禾轮的推送角， $^\circ$ ； $\gamma$  为输送带安装倾角， $^\circ$ ； $O, O_1, O_2$  为拨禾轮随机器前进过程中不同的中心位置； $A_1$  为拨禾轮中心运动到  $O_1$  时，拨禾板与油菜茎秆作用点； $A_2$  为拨禾轮中心运动到  $O_2$  时，拨禾板与油菜茎秆作用点； $A_3$  为不受拨禾板压缩作用影响的最外层油菜茎秆上与  $A_2$  点处于同一高度的点； $B, B_1, B_2, B_3$  分别为油菜生长点； $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4$  分别表示割刀位置。

Note:  $\omega$  is angular velocity of reel, mm/s;  $v_f$  is forward speed of machine, m/s;  $H$  is the height between reel center and cutter, mm;  $h$  is the height of cutter over the surface, mm;  $L$  is plant height, mm;  $L_1$  is cutted plant height, mm;  $R$  is reel radius, mm;  $\alpha$  is transfer angle of rape plant compression wave,  $^\circ$ ;  $\beta$  is push angle,  $^\circ$ ;  $\gamma$  is assemble angle of transportation device,  $^\circ$ ;  $O, O_1, O_2$  are reel center position when machine is running;  $A_1$  is the reel action point on rape stem when reel center is running to position  $O_1$ ;  $A_2$  is the reel action point on rape stem when reel center is running to position  $O_2$ ;  $A_3$  is the point of the outer layer rape stem which is not by reel compressed in same height  $A_2$ ;  $B, B_1, B_2, B_3$  are rape growing point;  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4$  are cutter position.

图 4 拨禾轮、割刀和输送带相互位置关系示意图

Fig.4 Position relationship of reel ,cutter and conveyor chain

实际工作中，视油菜生长密度来调节拨禾轮相对于割刀和输送装置的水平距离，油菜生长越密，拨禾轮相对于割刀的水平距离加大。考虑到兼收水稻和小麦，取拨禾轮半径  $R=500$  mm， $\lambda$  取 1~1.2<sup>[24]</sup>，拨禾轮中心与割刀的水平距离调节范围应为 0~276 mm，设计时取 140 mm，在结构设计上可以前后调节 20 mm。割刀和输送装置前端之间的水平距离应根据油菜茎秆高度而定，一般不超过 300 mm。

### 4.2 输送装置、拨禾轮、割刀的垂直距离

油菜割晒作业过程中，油菜茎秆被割断后，要

求拨禾板继续起推送作用，使割倒的油菜茎秆离开割刀，并且在拨禾板的推送作用下，油菜茎秆整齐的向后铺放在输送带上。这就要求拨禾板的作用点位于已割倒的油菜茎秆重心的稍上方，这样，就能将油菜茎秆稳定的向后推送，直到油菜茎秆与拨禾轮圆周相切的位置。

如图 4 所示，若油菜茎秆已割部分的长度为  $L_1$ ，重心的位置一般在顶部向下的  $1/3$  处<sup>[24-25]</sup>，即： $l=L_1/3$ ，因此，要使拨禾轮对割倒的油菜茎秆有稳定的推送作用，拨禾轮中心与割刀的安装高度满足以下条件

$$H > R + \frac{2}{3}(L - h) \quad (3)$$

式中， $H$  为拨禾轮中心与割刀的安装高度，mm； $L$  为油菜生长高度，mm； $h$  为割刀离地高度，mm。

在实际设计中，综合考虑移栽油菜和直播油菜，割后油菜植株质心的平均高度为 600 mm 左右，当拨禾轮半径为 500 mm 时，拨禾轮中心的高度应大于 1 100 mm。拨禾轮高度为液压控制，高度可调。输送装置前端与割刀的垂直距离应小于 125 mm，否则割倒的油菜茎秆会堆积在割刀上，影响输送。

### 4.3 输送装置安装倾角

油菜茎秆被割断后，脱离地面到达输送带上，由于拨禾轮相对输送带是圆周运动，油菜茎秆与拨禾轮圆周相切的位置就是拨禾板推送油菜茎秆的最后位置，如图 4 所示。

油菜茎秆被割倒经过拨禾轮的推送作用之后，应即时顺利地倒向输送带，所以，输送带安装倾角应满足以下条件

$$\gamma \leq 90^\circ - \beta = 90^\circ - \arcsin \frac{R}{H} \quad (4)$$

式中， $\beta$  为拨禾轮的推送角，(°)； $\gamma$  为输送带安装倾角，(°)。

由于油菜在割晒作业时处于黄熟期，茎秆韧性较好，拨禾轮对油菜茎秆的扶持切割作用可以减弱，由图 2 可知，拨禾轮相对于割刀后移，推送角增大，拨禾轮对油菜茎秆的推送作用加强，有利于把割倒的油菜茎秆快速、顺利地推向输送带。

在实际设计中，输送带安装倾角取  $10^\circ \sim 20^\circ$ 。倾角过大或过小，会引起油菜茎秆交叉，影响铺放效果。

## 5 输送装置运动学和动力学分析

### 5.1 拨指运动轨迹

拨指运动是随链条向排禾口运动和随机器前进运动的合成，运动轨迹方程如下

$$\begin{cases} x = v_d t \\ y = v_j t \end{cases} \quad (5)$$

式中， $v_d$  为输送带速度，m/s； $v_j$  为机器前进速度，m/s。

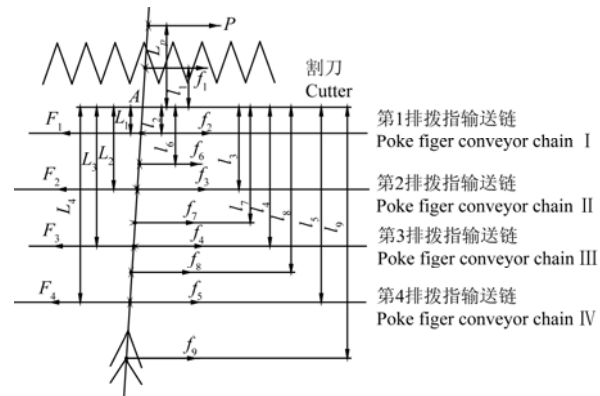
可以看出，拨指的运动轨迹方程是一条斜率为  $\frac{v_d}{v_j}$  的斜线，在实际输送过程中，输送的速度与机器前进速度的比值会影响输送的油菜茎秆的轨迹。

### 5.2 输送带上油菜茎秆的受力分析

输送带上油菜茎秆的受力如图 5 所示，切割后的油菜茎秆倒在输送带上，进行横向输送的条件是

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 > P + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8 + f_9 \quad (6)$$

式中， $F_1, F_2, F_3, F_4$  为输送拨指对茎秆的作用力，N； $P$  为切割后油菜茎秆下滑前伸受到未割油菜茎秆的阻力，N； $f_1$  为油菜茎秆根部在输送过程中与切割器、护刃器的摩擦阻力，N； $f_2, f_3, f_4, f_5$  为油菜茎秆与链盒之间的摩擦阻力，N； $f_6, f_7, f_8$  为油菜茎秆与输送带之间的摩擦阻力，N； $f_9$  为油菜茎秆穗部与割晒台后侧板之间的摩擦阻力，N。



注： $F_1, F_2, F_3, F_4$  为输送拨指对茎秆的作用力，N； $P$  为切割后油菜茎秆下滑前伸受到未割油菜茎秆的阻力，N； $f_1$  为油菜茎秆根部在输送过程中与切割器、护刃器的摩擦阻力，N； $f_2, f_3, f_4, f_5$  为油菜茎秆与链盒之间的摩擦阻力，N； $f_6, f_7, f_8$  为油菜茎秆与输送带之间的摩擦阻力，N； $f_9$  为油菜茎秆穗部与割晒台后侧板之间的摩擦阻力，N； $L_1, L_2, L_3, L_4, L_p, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9$  分别是力  $F_1, F_2, F_3, F_4, P, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8$  到 A 点的力臂，m。A 点是倒向输送带的油菜茎秆首先与输送带前部接触点。

Note:  $F_1, F_2, F_3, F_4$  are force between Poke figer and rape plants, N;  $P$  is resistance between cutted rape plants and uncutting rape plants, N;  $f_1$  is friction between rape plants and cutter, N;  $f_2, f_3, f_4, f_5$  are friction between rape plants and locket, N;  $f_6, f_7, f_8$  are friction between rape plants and conveyor belt, N;  $f_9$  is friction between rape plants and side plate, N;  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_p, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9$  is respectively force arm of  $F_1, F_2, F_3, F_4, P, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8$  to point A, m. A is the first contact point between cutted rape plants and transportation device.

图 5 输送带上油菜茎秆的受力分析

Fig.5 Force analysis of rape plants on conveyor chain

在输送带安装的过程中，第 1 条输送链高出割刀平面一定高度，形成一个台阶，所以，倒向输送带的油菜茎秆首先与该台阶接触，即图 5 中的 A 点。

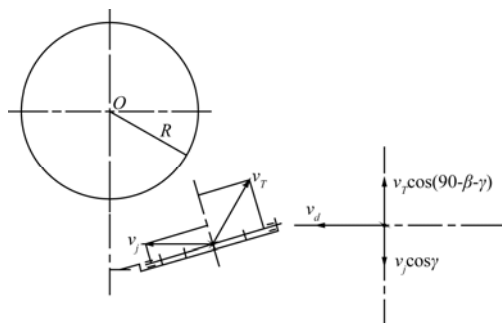
所以，油菜茎秆在输送过程中，保持整齐不倾斜输送的必要条件是各力绕 A 点的力矩之和为零，即

$$F_1L_1 + F_2L_2 + F_3L_3 + F_4L_4 + PL_P + f_1l_1 = f_2l_2 + f_3l_3 + f_4l_4 + f_5l_5 + f_6l_6 + f_7l_7 + f_8l_8 + f_9l_9 \quad (7)$$

式中， $L_1, L_2, L_3, L_4, L_P, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9$  分别是力  $F_1, F_2, F_3, F_4, P, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8$  到 A 点的力臂，m。

### 5.3 输送带上油菜茎秆的速度分析

输送带上油菜茎秆的速度如图 6 所示，在输送带垂直的平面内，输送带上的油菜茎秆随机器一起前进的速度  $v_j$ ，同时，拨禾轮对油菜茎秆向后推送产生一切向速度  $v_T$ 。在输送平面内，油菜茎秆随输送带的前进速度  $v_d$ ，油菜茎秆的速度是以上 3 个速度的合成。



a. 输送带垂直平面内  
a. In plane vertical to transportation plane  
b. 输送带平面内  
b. In transportation plane

注： $v_d$ 为输送带速度，m/s； $v_j$ 为机器前进速度，m/s。 $v_T$ 为拨禾轮线速度，m/s； $R$ 为拨禾轮半径，mm； $\beta$ 为拨禾轮的推送角， $^\circ$ ； $\gamma$ 为输送带安装倾角， $^\circ$ ； $O$ 为拨禾轮中心。

Note:  $v_d$  is conveyor belt speed, m/s;  $v_j$  is forward speed of machine, m/s;  $v_T$  is reel linear velocity, m/s;  $R$  is reel radius, mm;  $\beta$  is push angle,  $^\circ$ ;  $\gamma$  is assemble angle of transportation device,  $^\circ$ ;  $O$  is reel center position.

图 6 输送带上油菜茎秆的速度分析

Fig.6 Velocity analysis of rape plants on conveyor chain

在输送平面内，油菜茎秆的速度如图 6b 所示，从图中可以看出，油菜茎秆具有和输送带同步速度向排禾口输送的条件是

$$R\omega \cos(90 - \beta - \gamma) = v_j \cos \gamma \quad (8)$$

式中， $\omega$  为拨禾轮角速度，rad/s。

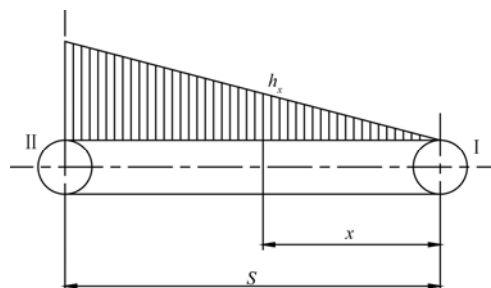
## 6 机器前进速度、输送带速度、拨禾轮转速之间相互关系

油菜割晒机所割油菜数量取决于割幅、机器前进速度及油菜生长密度。割倒的油菜茎秆进入输送带，铺成一定的厚层，所以输送带的速度要与切割量相互适应<sup>[21]</sup>。

如图 7 所示，输送带上任一点从轴 I 往排禾口所走的距离  $x$  与机器在同一时间内所走的距离  $y$  成正比，即

$$\frac{x}{y} = \frac{v_d}{v_j} \quad (9)$$

式中， $x$  为输送带上任一点从轴 I 往排禾口所走的距离，mm； $y$  为机器在同一时间内所走的距离，mm。



注：I、II 代表输送带传动轴； $x$  为输送带上任一点从轴 I 往排禾口所走的距离，mm； $h_x$  为在距离为  $x$  处输送带上油菜茎秆堆积高度，mm； $S$  为输送带长度，mm。

Note: I, II represent conveyor belt transmission shaft;  $x$  is the point on conveyor belt running distance from transmission shaft I to outlet, mm;  $h_x$  is rape plants stack height on the distance of  $x$ , mm;  $S$  is conveyor belt length, mm.

图 7 输送带上油菜茎秆输送过程示意图

Fig.7 Transport process of rape plants on conveyor chain

另一方面，所割油菜的数量与油菜生长密度及机器前进时所切割的面积成正比，即

$$q_x = \frac{1}{2} kxy \quad (10)$$

式中， $q_x$  为所割油菜的数量，即所切割面积内油菜茎秆的质量，kg； $k$  为单位面积内生长的油菜茎秆质量， $\text{kg}/\text{m}^2$ 。

割倒的油菜茎秆经过输送带输送后，在距离为  $x$  处堆积高度为  $h_x$ ，则有

$$q_x = k_1 \frac{x B h_x}{2} \quad (11)$$

式中， $h_x$  为在距离为  $x$  处油菜茎秆堆积高度，mm； $B$  为输送带宽度，mm； $k_1$  为单位体积内割倒的油菜茎秆质量， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

由式 (9) ~ 式 (11) 式可知：在输送带末端，即排禾口处，油菜茎秆堆积高度为

$$h_l = \frac{k}{k_1 B} \frac{v_j}{v_d} S \quad (12)$$

式中， $h_l$  为输送带末端油菜茎秆堆积高度，mm； $S$  为输送带长度，mm；

由图 4 可知，要实现输送带上油菜茎秆在排禾口处顺利铺放， $h_l$  必须满足以下条件

$$B \sin \gamma + h < h_l < H - R \quad (13)$$

另一方面，输送带输送油菜茎秆的量应与拨禾切割油菜茎秆的量相互适应，即

$$\frac{S}{v_d} v_j \frac{1}{m} = n X_z = n \frac{2\pi R}{z\lambda} = n \frac{2\pi R}{z} \frac{v_j}{R\omega} \quad (14)$$

式中,  $m$  为油菜种植株距, mm;  $n$  为拨禾轮节距个数;  $X_z$  为拨禾轮节距, mm;  $z$  为拨禾轮拨禾板数目;  $\omega$  为拨禾轮角速度, rad/s。

式(13)、式(14)给出了机器前进速度, 输送带速度, 拨禾轮转速与油菜茎秆顺利输送铺放的相互关系。

实际设计中取拨禾轮半径 500 mm, 拨禾轮拨禾板数目为 5, 机器前进速度 0.43~0.96 m/s, 输送带速度 2.5~3.5 m/s, 拨禾轮转速 14~24 r/min, 拨禾轮圆周线速度与机器前进速度的比值控制在 1.1~1.5, 输送带速度与前进速度的比值控制在 3.2~5.0 时, 铺放效果达到要求<sup>[26-29]</sup>。

## 7 田间试验

在江苏省江都市小纪镇宗村对该油菜割晒机输送铺放装置进行了田间试验。油菜割晒机主要与油菜捡拾收获机配套使用, 实现油菜机械化分段收获。使用油菜捡拾收获机捡拾收获割晒的油菜茎秆时, 茎秆铺放角 $\leq 90^\circ$ , 铺放角度差 $\leq 90^\circ$ 均能实现收获。收割油菜品种: 宁杂 11 号, 油菜移栽种植于 2012 年 9 月 27 日播种, 2012 年 11 月 4 日移栽, 种植密度为 12 万株/hm<sup>2</sup>。2013 年 5 月 29 日进行割晒作业, 田间试验面积 1.3 hm<sup>2</sup>, 试验状况如图 8 所示, 对各项指标进行了检测<sup>[30-32]</sup>, 结果如表 2。



图 8 样机田间试验

Fig.8 Field experiment of prototype

表 2 样机性能测试试验结果

Table 2 Test results of prototype performance

参数 Parameters	数值 Values
割幅 Cutting width/m	1.80
割茬高度 Cutting height/m	0.19
铺放高度 Windrowing height/m	0.86
铺放宽度 Windrowing width/m	1.83
茎秆铺放角 Windrowing angle/(°)	$\leq 32^\circ$
铺放角度差 Windrowing angle difference/(°)	$\leq 25^\circ$
总损失率 Loss percent/%	0.8
作业速度 Working speed/(m·s <sup>-1</sup> )	0.65
纯工作生产率 Productivity/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.50

选取茎秆铺放角、铺放角度差、油菜机械割晒总损失作为评价油菜割晒机作业效果指标<sup>[8]</sup>。从试验数据可以看出, 油菜割晒作业损失率低。主要原因是割晒作业时, 油菜处于黄熟期, 炸荚损失较小。2013 年 6 月 8 日, 4SJ-1.8 型油菜捡拾收获机对所割晒的油菜进行了捡拾收获作业, 机器割晒后的油菜茎秆捡拾流畅, 证明油菜割晒铺放质量达到要求。

## 8 结 论

1) 本文设计了油菜割晒机拨指输送链式输送装置, 完成油菜割晒输送与铺放作业。油菜割后呈鱼鳞状铺放于田间, 便于摊晒, 便于后续捡拾作业。

2) 分析了拨指运动轨迹方程, 油菜茎秆在输送带上的受力, 给出了排禾口结构设计要求。在保证拨指运动不干涉的条件下, 控制拨指运动的轨道应尽量前伸, 以保证拨指回缩之前一直对油菜茎秆有拨动输送作用。

3) 针对油菜植株高大, 分枝多, 冠层直径大, 分枝相互交叉的特点, 在分析拨禾轮对油菜茎秆压缩作用过程以及对已割油菜茎秆推送作用的基础上, 确定了输送装置、拨禾轮、割刀三者之间的水平与垂直安装距离的数学表达式, 确定了输送部件安装倾角与推送角之间的数学表达式。拨禾轮中心与割刀的水平距离调节范围应为 0~276 mm, 割刀和输送装置前端之间的水平距离应根据油菜茎秆高度而定, 一般不超过 300 mm。拨禾轮中心的高度应大于 1 100 mm, 高度可调。输送装置前端与割刀的垂直距离应小于 125 mm。输送带装置安装倾角 10°~20°。

4) 确定了机器前进速度, 输送带速度, 拨禾轮转速与油菜茎秆顺利输送铺放的相互关系。拨禾轮圆周线速度与机器前进速度的比值控制在 1.1~1.5, 输送带速度与前进速度的比值控制在 3.2~5.0。田间试验表明: 油菜割晒作业总损失率 $\leq 0.85\%$ , 油菜茎秆铺放角 $\leq 32^\circ$ , 铺放角度差 $\leq 25^\circ$ , 铺放质量达到要求。

### [参 考 文 献]

- [1] 官春云. 优质油菜生理生态和现代栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 1-5.
- [2] 黄小毛, 宗望远. 油菜联合收获的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2012, 2(1): 14-19.  
Huang Xiaomao, Zong Wangyuan. Research status and development trend of rape combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(1): 14-19. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴崇友, 金诚谦, 肖体琼, 等. 我国油菜全程机械化现状与技术影响因素分析[J]. 农机化研究, 2007(12): 207-210.  
Wu Chongyou, Jin Chengqian, Xiao Tiqiong, et al. Analysis on rape mechanization present situation and technical affection factors in whole productive course in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(12): 207-210. (in Chinese with English abstract)

- [4] 金诚谦, 吴崇友. 油菜收获技术基础研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2010, 32(1): 5—9.  
Jin Chengqian, Wu Chongyou. Review and perspectives of research status on rape harvest technique[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(1): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘德军, 赵秀荣, 高连兴, 等. 不同收获方式含水率对油菜收获物流损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 339—342.  
Liu Dejun, Zhao Xiurong, Gao Lianxing, et al. Effect of moisture content on rape harvest logistics losses under different harvest methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 339—342. (in Chinese with English abstract)
- [6] 曹震, 金鑫, 黄海东, 等. 4SY-1.8型油菜割晒机的设计[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4): 521—524.  
Cao Zhen, Jin Xin, Huang Haidong, et al. Design of 4SY-1.8 rape windrower[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2011, 30(4): 521—524. (in Chinese with English abstract)
- [7] 金鑫, 舒彩霞. 4SY-1.8型油菜割晒机输送与铺放装置设计[J]. 农业工程, 2011, 1(9): 77—82.  
Jin Xin, Shu Caixia. Design on conveying and placing device of 4SY-1.8 rape windrower[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(9): 77—82. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张连奇. 手扶油菜割晒机的研制[J]. 湖北农机化, 2011, 2: 57—59.
- [9] 金诚谦, 吴崇友, 金梅, 等. 4SY-2型油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 76—79.  
Jin Chengqian, Wu Chongyou, Jin Mei, et al. Design and experiment of 4SY-2 rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 76—79. (in Chinese with English abstract)
- [10] 潘家善, 郝启悼, 梅光月. 南-303 稻麦收割机设计研究[J]. 农业机械学报, 1966, 9(3): 261—264.
- [11] 张杨, 区颖刚, 牟向伟. 基于 ADAMS 的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 88—93.  
Zhang Yang, Ou Yinggang, Mou Xiangwei. Virtual test on the finger-chain type sugarcane-lifter based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 88—93. (in Chinese with English abstract)
- [12] 韩正晟, 赵武云, 杨天兴. 4GG-170 型高速收割机的试验分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 56—59.  
Han Zhengsheng, Zhao Wuyun, Yang Tianxing. Experimental analysis on 4GG-170 high speed harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [13] 廖庆喜, 田波平, 舒彩霞, 等. 4ZG-2.1 芦竹收获机的研制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 86—89.  
Liao Qingxi, Tian Boping, Shu Caixia, et al. Research on type 4ZG-2.1 arundo donax harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 86—89. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李旭, 舒彩霞, 黄海东, 等. 高粗茎秆作物收割技术的研究进展[J]. 农机化研究, 2010(8): 1—6.  
Li Xu, Shu Caixia, Huang Haidong, et al. Harvest cutting technology of thicktall stem crops at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(8): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [15] Hobson R N, Bruce D M. Seed loss when cutting a standing crop of oilseed rape with two types of combine harvester header[J]. Biosystems Engineering, 2002, 81(3): 281—286.
- [16] Maertens K, De Baerdemaeker J. Design of a virtual combine harvester[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 65(1/2): 49—57.
- [17] Dolneika R, Jasinskas A, Steponavicius D, et al. The estimation methods of oilseed rape harvesting losses[J]. Agronomy Research, 2008, 6(6): 191—198.
- [18] Bogustawaszot, Mieczystaw Szpryngiel, Jerzy Tys. Crop yield losses reduction at harvest, from research to adoption[J]. Encyclopedia of Earth Sciences Series, 2011(3): 176—180.
- [19] Bruce D M, Farrent J W, Morgan C L, et al. Precision agriculture: Determining the oilseed rape pod strength needed to reduce seed loss due to pod shatter[J]. Biosystems Engineering, 2002, 81(2): 179—184.
- [20] Petre I Miu. Mathematical model of threshing process in an axial unit with tangential feeding[C]// AIC 2002 Meeting, 2002, 219.
- [21] MH 列夫施曼夫. 农业机械[M]. 北京: 农业出版社, 1965.
- [22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [23] 吴守一. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1992.
- [24] 陈翠英, 王新忠, 何增富. 谷物联合收获机油菜收获割台的设计[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 54—60.  
Chen Cuiying, Wang Xinzhong, He Zengfu. Design of header for rape harvesting using grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [25] 徐立章, 李耀明, 马朝兴, 等. 4LYB1-2.0 型油菜联合收获机主要部件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 54—57.  
Xu Lizhang, Li Yaoming, Ma Chaoxing, et al. Design of main working parts of 4LYB1-2.0 rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 54—57. (in Chinese with English abstract)
- [26] 谭鸿雁, 孙炳银. MACDON-7000 型自走式割晒机及其放铺质量的因子分析[J]. 现代化农业, 2003(5): 30—31.
- [27] 林景尧. 割晒机 V 机/V 帆值的选择[J]. 农业机械学报, 1983, 3(1): 105—110.  
Lin Jingyao. The choice of forward speed to canvas speed ratio of windrowers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 3(1): 105—110. (in Chinese with English abstract)
- [28] 林景尧, 邓华文. 割晒机放铺质量的研究[J]. 农业机械学报, 1983, 6(2): 66—73.  
Lin Jingyao, Zheng Wenhua. A study on the quality of the swath laid by the windrowers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 6(2): 66—73. (in Chinese with English abstract)
- [29] 金诚谦, 尹文庆, 吴崇友. 4SY-2 型油菜割晒机铺放质量数学模型与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 45—48.  
Jin Chengqian, Yin Wenqing, Wu Chongyou. Mathematical model and influencing factors analysis for windrow quality of 4SY-2 rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 45—48. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李耀明, 孙韬, 徐立章. 油菜多滚筒脱粒分离装置的性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 36—43.  
Li Yaoming, Sun Tao, Xu Lizhang. Performance test and

analysis of rape multi cylinder threshing and separating device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 36-43. (in Chinese with English abstract)

[31] 苏均和. 试验设计[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2005.

[32] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

## Development and experiment of rape windrower transportation device with poke finger conveyor chain

Jin Chengqian<sup>1,2</sup>, Yin Wenqing<sup>1\*</sup>, Wu Chongyou<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The rape plant area is the largest in oil-bearing crops in China, and accounts for a quarter of the total rape plant population in the world. However, the uneven maturity of this rape limits the development of rape harvest mechanization. Rape partition harvest technology is composed of windrowing technology and collecting threshing technology. The rape plant is cut in the first stage, maturity. Maturity consistency and plant type are not important in the rape windrowing operation. It has the advantage of strong adaptability and a long harvest time. So rape partition harvest technology has an extensive market foreground and utility value. Windrowing technology is a difficulty in rape partition harvest technology. How to solve the problems of windrowing and transportation are the main and most difficult points in the process of designing a windrower. Focusing on the problem of windrowing and transporting in rape windrowing, a rape windrower with a vertical cutter, level cutter, machine frame, poke finger conveyor chain, driveline component, interface component, and reel device was designed. This machine was hitched with a combine chassis with functions of cutting, transporting, and windrowing. A transportation device was composed of 4 strips on a rotation poke finger conveyor chain; the poke finger conveyor chain was installed in chains. The poke finger was articulated on the chain, so it could stick out and retract while controlled by a guide in locked position. Rape plant on the transportation device was transported to an outlet by the exertion poke finger. It was windrowed in the field when the poke finger was retracted in the outlet. The requirements of the outlet structure design were given in this paper. Based on analysis of the action process of reel and rape plants, parameters of expression of level and vertical distance between reel and cutter were established, and correlation between the installation angle of the transportation part and push angle of the reel was given. The level distance between the reel and cutter was determined by the rape growth density. As the value of 500mm for reel radius, 1-1.2 for  $\lambda$ , level distance between reel and cutter could be adjusted from 0 to 276mm. In this machine, the distance was 140mm, and it could be adjusted to 120mm or 160mm. The level distance between the transportation device's front end and the cutter was determined by the rape plant height. It was generally less than 300mm. The height of the reel center was more than 1100mm. It could be adjusted by a hydraulic mechanism. The vertical distance between the transportation device's front end and the cutter was less than 125 mm, otherwise the accumulation rape plant on the cutter would be transported. The assemble angle of the transportation device was from 10° to 20°. The angle which was too large or too small was unfavorable to rape plant windrowing. The poke finger movement locus equation, force analysis of rape plants on the conveyor chain, and structure design requirements of the outlet were given. The correlation between windrow quality and speed, the transporting device parameter, and windrow factor was given. The ratio of the reel pad peripheral speed and machine moving speed should be chosen in the range of 1.1-1.5. The ratio of the conveyor belt speed and the machine moving speed should be chosen in the range of 3.2-5.0. The results of a field test showed that the rape windrower worked stably and well. Rape characteristics in the experiment were listed as follows: plant height 172.1 cm, main stem diameter 14.7mm, first branch number 10, first branch height 20.7cm, the largest canopy diameter 121.1cm, the largest canopy height 130.2cm, productivity per plant 50.98g, yield 2170kg/hm<sup>2</sup>, stem moisture content 65.8%, and grain moisture content 21.3%. The checked indexes were listed as follows: cutting width 1.80m, cutting height 0.19 m, windrowing height 0.86m, windrowing width 1.83m, windrowing angle  $\leq 32^\circ$ , windrowing angle difference  $\leq 25^\circ$ , loss percent  $\leq 0.8\%$ , working speed 0.65 m/s, and productivity 0.5 hm<sup>2</sup>/h. All the checking indexes reached or exceeded the design technical requirements.

**Key words:** agricultural machinery, transportation, harvesting, windrower, windrowing, rape

(责任编辑: 张俊芳)