

针孔管式小麦匀播机构气力损耗特性数值分析与试验

刘俊孝^{1,2} 王庆杰^{1,2} 李洪文^{1,2} 何进^{1,2} 卢彩云^{1,2} 王超^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针孔管式小麦匀播机构的气道结构复杂、排布密集、截面积多变、弯折狭长,对气流的流通造成阻碍。为优化机构参数、减少气力损耗、提高气力利用效率,本文通过对流体域内可导致气力损耗的区域(变截面狭长圆柱区域、输气管弯折区域、气室汇流区域及负压口-气室连接区域)进行分析,明晰了各区域产生气力损耗的原理及类型,得出横向输气管直径、输气管夹角及负压口直径是影响气力损耗的关键参数。以上述参数为试验因素,以吸种孔平均气流速度、吸种孔最低气流速度及吸种孔速度标准差为试验指标,利用 Fluent 软件进行三因素三水平正交仿真试验,得到各参数对指标的影响程度,并确定气力损耗最小的参数组合为:横向输气管直径 8 mm、输气管夹角 105°、负压口直径 36 mm。在此参数组合下,吸种孔平均气流速度为 86.4 m/s,吸种孔最低气流速度为 75.16 m/s,吸种孔速度标准差为 7.35 m/s。样机试验结果略小于仿真结果,但趋势一致,验证了数值分析的可靠性。

关键词: 小麦; 针孔管式; 精密排种器; 气力损耗; 数值分析

中图分类号: S223

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)06-0029-09

OSID:



Numerical Analysis and Experiment on Pneumatic Loss Characteristic of Pinhole-tube Wheat Uniform Seeding Mechanism

LIU Junxiao^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} LI Hongwen^{1,2} HE Jin^{1,2} LU Caiyun^{1,2} WANG Chao^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Design and Optimization in Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to the problem of pneumatic loss caused by the complex structure, dense arrangement, variable cross-sectional area, bending, narrow and long characteristics of air passage on the pinhole-tube wheat wide-width precision uniform seeding mechanism. The fluid domain was divided into four regions according to the type of pneumatic transformation: variable-area long-narrow cylindrical zone, air pipeline curved zone, air chamber confluent zone and negative pressure port and air chamber connection zone. By analyzing the regions in the fluid domain that can lead to the pneumatic loss one by one, the principle and types of the pneumatic loss in each region were clarified. It was concluded that the diameter of the transverse air pipeline, the angle of the air pipeline and the diameter of the negative pressure port may have significant impact on the pneumatic loss. The above three parameters were taken as test factors, and the mean airflow velocity of seed hole, the minimum airflow velocity of seed hole and the standard deviation of seed hole velocity were taken as test indexes. The Fluent software was used to conduct the orthogonal simulation test of three factors and three levels. The influence degree of each parameter on the index was obtained by range analysis and variance analysis, and the best combination of parameters was determined as follows: the diameter of transverse air pipeline was 8 mm, the angle of air pipeline was 105°, and the diameter of negative pressure port was 36 mm. Under these parameters, the average air velocity of seed hole was 86.4 m/s, the minimum air velocity of seed hole was 75.16 m/s, and the standard deviation of seed hole velocity was 7.35 m/s. Under the optimal parameters mentioned above, pinhole-tube wheat wide-width precision uniform seeding mechanism was verified, and the test result was slightly smaller than simulation result, but the trend was consistent, which proved the reliability of the numerical analysis.

Key words: wheat; pinhole-tube type; precision seed-metering device; pneumatic loss; numerical analysis

收稿日期: 2019-09-22 修回日期: 2019-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)

作者简介: 刘俊孝(1992—),男,博士生,主要从事精量播种技术与装备研究,E-mail: B20173070539@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作及精量播种研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

0 引言

小麦宽幅精量匀播是将传统密集条播改为宽幅精播的一项高产、高效栽培技术,具有增强个体发育、优化麦田群体的动态结构,减少作物间对光照、水分和养料的竞争,具有节种、节水、节肥、增产等优势^[1-5]。文献[6-9]研究表明,与小麦传统无序密集条播相比,若实现种子在种沟内有序均匀分布,则可降低播种量 25%、减少化肥施用量 24%、提高作物产量 10%,具有重大的生态和经济效益。

为实现这一目标,笔者设计了一种针孔管式小麦匀播机构^[10]。但该机构相对复杂,气道分支多、排布密集、截面积多变、弯折狭长等,对气流的流通造成阻碍,产生严重的气力损耗,进而导致气力利用效率降低、风机配套困难、能源浪费严重等问题。

在气力式排种器流场分析及数值分析方面,国内外学者进行了一些研究^[11-17],研究表明,利用数值分析方法可以有效地模拟播种机内部的流场,优化关键部件的机构参数。但上述研究主要以气力集排型大管径输送气道或排种器内部的柱状容腔为研究对象,具有气道宽敞、结构简单等特点,尚未见对狭长、变径、复杂气道的相关研究。

因此,本文以针孔管式小麦匀播机构内部气道结构及流场分布为研究对象,通过理论分析、Fluent 数值分析及试验验证等,研究气道结构变化对气力的损耗情况,以期减弱复杂结构气道对气流的阻碍作用,降低气力损耗,提高气力利用效率。

1 气力模型建立

1.1 工作原理

针孔管式小麦匀播机构工作原理如图 1 所示:针孔吸种管均匀排布在播种轮圆周上,并随播种轮同步转动,工作时,种箱中的针孔吸种管利用负压吸取种子,再由清种机构清种,实现单粒吸附,随后在负压作用下携带种子转动至接近种床时,切断气流,种子落入种沟,完成单粒低位精准投种,实现宽幅精量匀播。

针孔管式小麦匀播机构的气力分配系统由与播种轮固联的气力分配中心和气力分配中心盖两部分组成,二者可相对旋转。气力分配中心盖与风机连接,分为负压区与无压区两部分,与分配中心相配合可形成密闭的气道空间,为处于吸种位置的针孔吸种管提供压力并在设定位置切断负压供给。

1.2 流体域模型

流体域分为两部分,一部分是气力分配中心盖所包含的上层流体域,另一部分是由播种轮内部形

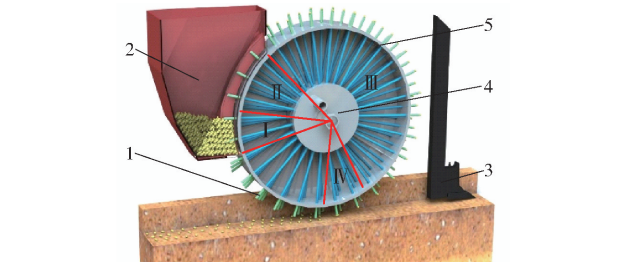


图 1 针孔管式小麦匀播机构原理图

Fig. 1 Sketch of pinhole-tube wheat wide-width precision uniform seeding mechanism

1. 针孔吸种管 2. 种箱 3. 开沟器 4. 气力分配系统 5. 播种轮

I. 吸种区域 II. 清种区域 III. 运种区域 IV. 投种区域

成的 69 个互不连通的子气道,当任一子气道与上层流体域连接时,子气道末端吸种孔带有负压,反之,则无气压。两部分在作业过程中相对旋转,从而实现切换相应位置气流通断。

利用 SpaceClaim 软件进行流体域提取,提取的流体域如图 2 所示。

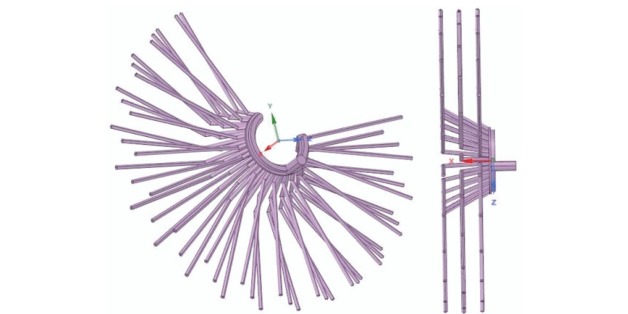


图 2 流体域

Fig. 2 Fluid domain

根据提取的流体域可知,同时与上层气室连接的下层子气道为 51 根。下文仅针对处于连接位置的气道进行研究。

1.3 气道区域划分

流体域结构较复杂,涉及多种形式的气道结构变化,按照气力变化类型分为 4 个区域:变截面狭长圆柱区域、输气管弯折区域(以直角为例)、气室汇流区域及负压口-气室连接区域,如图 3 所示。

2 气道区域气力分析

气道内部气体流速远小于声速,可将空气视为不可压缩流体。气力输入为负压,整个气力系统的入口为 51 个吸种孔,出口为负压口。从气流入口开始对 4 个区域进行分析。

2.1 变截面狭长圆柱区域

变截面狭长圆柱区域如图 3a 所示,可分为两部分:吸种孔过渡至狭长输气管,气力变化类型为管道的突然扩张,主要为局部气力损耗,沿程气力损耗可以忽略不计;狭长输气管,无局部气力损耗,均为沿

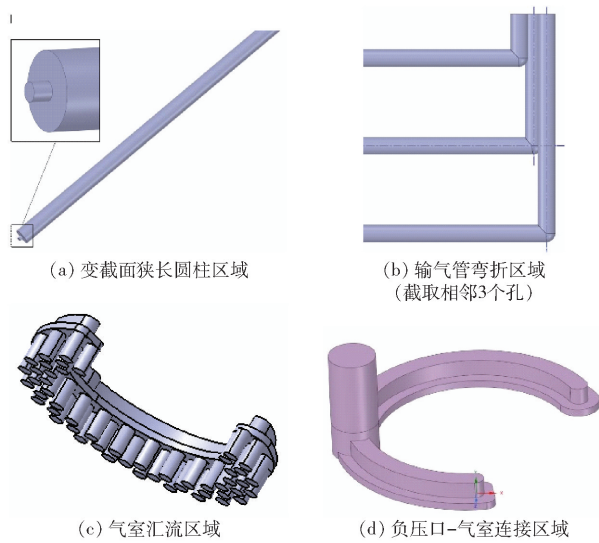


图3 气道区域划分

Fig.3 Air pipeline zoning

程气力损耗。

2.1.1 吸种孔-狭长输气管过渡部分气力分析

吸种孔-狭长输气管过渡部分的气力变化类型属扩散流动,扩散流动相较于收缩流动,能量损失更大。分为突扩与渐扩两种形式,渐扩形式相较于突扩形式气力损耗小,阻力减小的程度取决于过渡段两侧斜壁的夹角,夹角越小阻力越小,所需导程也就越长,而大于30°的夹角对阻力的减小效果不明显。吸种孔-狭长输气管过渡部分空间狭小,利用机械加工方法制作小角度、长导程的锥形孔很难实现,因此将此处收缩流动视为突扩形式。突扩管在截面积变化后,气流平衡前流体将与壁面分离并形成涡流,因此必然有局部的流动能量损失^[18]。

局部损失根据包达定理有

$$h_{j1} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{v_{in}^2 - v_{out}^2}{2g} = \frac{v_{in}^2 - v_{out}^2}{g} + \frac{v_{in}^2 - v_{out}^2}{2g} = \frac{(v_{in} - v_{out})^2}{2g} \quad (1)$$

式中 h_{j1} ——突然扩大形式局部损失

p_1 ——入口压力,Pa

p_2 ——出口压力,Pa

ρ ——介质密度,kg/m³

g ——重力加速度,m/s²

v_{in} ——入口气流速度,m/s

v_{out} ——出口气流速度,m/s

根据连续性方程有

$$A_1 v_{in} = A_2 v_{out} = Q \quad (2)$$

式中 A_1 ——入口截面积,m²

A_2 ——出口截面积,m²

Q ——流量,m³/s

将式(2)代入式(1),得

$$h_{j1} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_{in}^2}{2g} \quad (3)$$

由式(3)可知,突然扩大形式的气力损耗主要与两侧的截面比和入口速度有关,在给定入口负压的情况下,将入口速度视为恒定,另由于前期研究^[10]已优化出最佳吸种孔直径,即 A_1 不可变,因此该部分气力损耗主要与出口截面积 A_2 (狭长输气管截面积)有关,且随狭长输气管的截面积减小而减小。

2.1.2 狭长输气管部分气力分析

狭长输气管部分过流断面的面积、形状和方向均保持不变,流体所受到的阻力只有管壁给予的摩擦阻力,因此全部为沿程损失^[19-20],则根据达西公式可知

$$h_{f1} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (4)$$

式中 h_{f1} ——狭长输气管部分沿程阻力损失,m

λ ——沿程阻力损失系数

l ——管长,m d ——管径,m

$\bar{v}$ ——输气管断面的平均流速,m/s

沿程阻力损失系数 λ 与流体流态有关,常根据雷诺数进行判断,雷诺数计算公式^[21]为

$$Re = \frac{\rho \bar{v} d}{\mu} \quad (5)$$

式中 μ ——流体的动力粘度,Pa·s

20℃常压下空气密度 ρ 取 1.205 kg/m³, μ 取 1.79×10^{-5} Pa·s,管径 d 暂取 8 mm,平均流速 $\bar{v}$ 取输气管内稳定后流速约 7 m/s,可解得雷诺数 Re 为 3 800,大于临界值 2 300,因此流体流态为紊流,但是数值小于 4 000,此时管道内的流体处于层流与紊流的过渡状态。

在过渡区域内沿程阻力损失系数 λ 随雷诺数 Re 的增大而增大,与壁面的相对粗糙度关系不大。则沿程阻力损失系数 λ ^[22]有

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6)$$

式中 Δ ——壁面的绝对粗糙度

将式(2)、(5)、(6)代入式(4)中,并进行经验公式化简有

$$h_{f1} = \frac{\rho^{\frac{1}{3}} Q^{\frac{7}{3}}}{800 g d^3 \mu^{\frac{1}{3}}} \quad (7)$$

由式(7)可知,狭长输气管部分的气力损耗主要与管长 l 、管径 d 、流量 Q 有关,管长 l 为气力输送的距离,需求一定,不易更改;流量 Q 主要与给定负压有关。因此,从设计角度减少气阻的主要手段为

调节管径 d , 当管径越大, 则气阻越小。

但在吸种孔-狭长输气管过渡部分, 气阻随狭长输气管的截面积减小而减小, 管径 d 对变截面圆柱区域两部分的影响相反, 仅靠理论分析, 无法得出结论, 仍需借助数值分析与试验手段进行研究。

2.2 输气管弯折区域

2.2.1 弯折区域气力损耗分析

输气管弯折部分的气道转换形式为横向气道转换为纵向气道, 如图 3b 所示。当气流流经连接处时, 弯管内侧由于速度不同产生涡流, 涡流与主流叠加在一起, 使得弯管处产生较大的局部能量损失。

目前使用广泛的弯管形式有两种, 一种是承插式弯管, 即两者相交而形成的弯折, 另一种是圆弧式弯管, 即连接处有一定的弧度, 不同构造对局部损失有较大影响。针孔管式小麦匀播机构的气力分配中心若使用机械加工方法制造, 在实体中钻取圆弧较大的弯形通道难度很大, 因此该处弯管形式为承插式弯管, 即急弯管。则输气管弯折部分气力损耗^[23]为

$$h_w = \left(0.946 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.05 \sin^4 \frac{\theta}{2} \right) \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (8)$$

式中 θ ——两输气管夹角

由式(8)可知, 输气管弯折部分气力损耗主要与两输气管夹角 θ 有关, 夹角越大, 则气力损耗越小。

2.2.2 输气口参数计算

研究输气管夹角 θ 前, 应首先确定输气管上端与气室相连的输气孔位置。输气孔应与上方的气力分配中心盖内部气室紧密配合, 应保证输气孔完全被容纳在气室空间内, 避免产生额外的阻力。因此输气孔位置受气力分配中心盖内部的橡胶密封圈尺寸限制, 橡胶制品制作需模具, 加工困难, 因此选用现有气吸式排种器的密封圈产品, 使尺寸受到一定限制。

为减少各支路气流的相互干扰, 输气孔位置分布应以在有限的空间内使输气孔之间的距离最大为准则, 根据常用密封圈尺寸可得出输气孔圆心所能到达的极限位置在 R_1 与 R_2 之间, 由每排需分布 23 个输气孔^[10]可计算出每组 3 排孔所能占用的最大角度 α , 在半径为 R_1 、 R_2 的圆弧上做 4 个圆与边线相切, 圆心分别为 A、B、C、D, 过线段 AD 的中点 E 与 BC 的中点 G 做垂线 a、b, 相交于 F, 为第 3 孔的位置。图 4 中 A、B、C、D、E、F、G 为点, a、b、c、d 为直线; α 为圆周排布 23 组孔所能排布的最大角度; β 为第 3 孔圆心 F 所在的直线 d 与边界线 c 的夹角;

d_k 为输气孔理论最大直径。

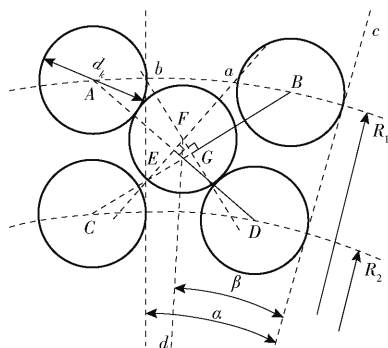


图 4 输气孔排列位置示意图

Fig. 4 Diagrammatic drawing of transport port arrangement

其中 R_1 、 R_2 由橡胶密封垫尺寸决定, 取 68.5、56 mm; α 为 15.652° 。

根据作图法, 得出三圆在有限空间内互不重叠的最大直径 d_k 为 10.129 mm, 圆心 F 点所在圆的半径为 62.7 mm, β 为 11.5° 。

输气孔之间应留出一定的壁厚, 保证强度要求, 因此综合考虑确定输气孔直径为 8 mm, 每 15.652° 分布 3 个孔, 每排 1 个, 输气孔位置如图 4 中 B、F、D 点所示, 共 23 组输气孔均匀分布于圆周。

2.2.3 输气管角度分析

当输气孔位置一定时, 夹角越大, 倾斜段的横向长度就越大, 气力分配中心也就需要占据更大的空间。横向长度与两输气管夹角 θ 关系为

$$\theta = 180^\circ - \arctan \frac{h}{l_h - R_2} \quad (9)$$

式中 h ——最外侧输气管圆心到输气孔所在面的垂直距离

l_h ——分配中心的横向长度

分配中心的横向长度越大, 播种轮气力分配中心半径越大, 播种轮越重, 在设计中希望分配中心的横向长度小于等于 150 mm, 以配合常用尺寸的外圈轴承。垂直距离应略大于 3 排播种宽度, 取 100 mm, 则可解得两输气管夹角 θ 应小于 122.62° 。

输气管弯折部分气力损耗随夹角的增大而减小, 但随夹角增大, 汇入气室时, 各支路气流速度方向与负压口的夹角也越大, 气室内不同速度方向的气流转变为速度方向一致的负压口气流也会产生额外的气力损耗, 因此具体气力损耗情况仍需通过数值分析进一步研究。

另外, 由于需分 3 排播种以实现整个播种带宽度为 80 mm, 3 排的竖直气道高度也有不同, 如图 3b 所示, 且横向段与纵向段管长亦随角度发生变化, 会造成各排气压存在差异, 应在数值分析中针对该现象进行研究, 若差异明显则应进行气压补偿。

2.3 气室汇流区域

气室汇流区域如图 3c 所示,为各输气管气流汇入到气力分配中心盖内气室空间的过程^[24],本质上为多个小截面管道转变为大截面容腔的流动形式,即出口式流动^[23],气力损耗基本为局部气力损耗,由式(3)可知,该区域的气力损耗主要取决于两侧的截面积,均难以加以改动,因此该区域可优化空间较小。通常在入口式流动情况下,将输气口的侧壁进行流线化或加以倒圆角可大大降低流动阻力,但对于出口形式,该方法作用较小。

2.4 负压口-气室连接区域

负压口-气室连接区域如图 3d 所示,全部包含在气力分配中心盖内部,为由圆弧形的气室转化为圆柱型气力出口的过程,气室截面大于出口截面,因此该区域气力变化形式为截面突然缩小形式,主要气力损耗为局部气力损耗^[25],有

$$h_s=0.5\left(1-\frac{A_2}{A_1}\right)\frac{v_{in}^2}{2g}$$
 (10)

式中 h_s ——负压口-气室连接区域气力损耗

由式(10)可知,入口截面积不可变,因此该部分气力损耗主要与负压口的截面积有关,且负压口越大气力损耗越小。但气力分配中心盖的空间有限,需留出空间以便于与机架固联,最大负压口直径可取到 36 mm。另由于结构限制,负压口流体域截面积能够保持完整圆形的最大直径为 21.5 mm,若继续增加,则两侧会被橡胶密封圈阻挡,负压口底部截面将由圆形变为由 4 条弧线所组成的类矩形,通过这一区域后,截面恢复到圆形截面,在局部区域,气力变化形式又转变为截面突扩,因此,最佳负压口直径仍有待进一步研究。

3 匀播机构流场仿真分析

3.1 边界层厚度计算

研究涉及到气力损耗,需要在数值分析中考虑壁面对气流的阻力作用^[26]。通常有两种求解方法,一种是壁面函数法,另一种是壁面模型法。壁面模型法所需网格密度为壁面函数法的数十倍,主要为求解粘性子层和低雷诺数湍流,适合于 $k-\omega$ 湍流模型。本文在输气管气力平衡阶段雷诺数较低,因此采用壁面模型法^[27]。计算第一层网格的高度^[28],有

$$y=\frac{\gamma^+\mu}{u_\tau\rho}$$
 (11)

其中 $u_\tau=\sqrt{0.029Re^{-0.2}v^2}$ (12)

式中 γ^+ ——无量纲壁面距离

u_τ ——壁面剪切应力速度

根据壁面模型法要求第 1 层网格节点位于粘性子层内,无量纲壁面距离应满足条件 $\gamma^+<5$,取 4,则可解出第 1 层网格的高度为 $5.56\times10^{-5}\text{ m}$ 。

3.2 气道仿真模型建立

将流体域导入流体分析软件 ANSYS Fluent 中,采用六面体结构化网格进行网格划分,设置边界层第一层网格的高度为 0.055 6 mm,边界层数为 10 层,网格增长系数 1.2,划分后流体域约 200 万网格。选择流体域为气体,定常密度,选用 Standard $k-\omega$ 湍流模型。入口边界条件采用压力入口边界,入口压力在 -6 kPa,出口边界条件为压力出口边界,压力为常压 0 Pa;壁面采用无滑移边界条件,气相湍流采用增强壁面函数。

3.3 仿真试验设计与结果

根据理论分析,以对流场分布产生影响且无法通过计算得出明确结论的横向输气管直径 d_h 、输气管夹角 θ 、负压口直径 D 为因素。试验因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素水平
Tab.1 Test factors and levels

水平	因素		
	横向输气管	输气管	负压口直径
	直径 d_h/mm	夹角 $\theta/(^\circ)$	D/mm
1	6	90	21.50
2	8	105	28.75
3	10	120	36.00

每组仿真产生 51 个吸种孔的数据,其中有 1 个吸种孔所连接的上端输气孔仅有一半与气室连接,为避免误差,将该孔数据剔除。

匀播机构要求整个流体域均保持一定的气力水平,并要求各吸种孔的吸种能力相近,保持气力稳定,提高气力利用效率。因此,选取吸种孔平均气流速度、吸种孔最低气流速度及吸种孔速度标准差为试验指标,进行三因素三水平正交仿真试验,仿真试验结果如表 2 所示,表中 A、B、C 为因素水平值。

3.4 仿真结果分析

3.4.1 方差与极差分析

对仿真试验结果进行方差与极差分析^[29],如表 3、4 所示。

最佳参数组合的选择依据为:吸种孔平均气流速度与吸种孔最低气流速度越大,则气道阻力及气力损耗越小;吸种孔速度标准差越小,则输气管之间的吸种性能差异越小,吸种稳定性越好。

表 2 仿真试验结果

Tab.2 Simulation test results

序号	因素			吸种孔平均 气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	吸种孔最低 气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	吸种孔速度 标准差/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
	A	B	C			
1	1	1	1	79.37	67.33	8.02
2	1	2	2	86.35	74.12	7.81
3	1	3	3	87.33	74.88	7.79
4	2	1	2	84.15	72.65	7.19
5	2	2	3	86.40	75.16	7.35
6	2	3	1	78.34	67.17	7.01
7	3	1	3	85.43	74.00	7.44
8	3	2	1	78.68	67.84	6.97
9	3	3	2	83.41	72.66	6.85

表 3 极差分析

Tab.3 Range analysis

分析项	吸种孔平均 气流速度			吸种孔最低 气流速度			吸种孔速度 标准差		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	84.35	82.98	78.80	72.11	71.33	67.45	7.87	7.55	7.33
K_2	82.96	83.81	84.64	71.66	72.37	73.14	7.18	7.38	7.28
K_3	82.50	83.02	86.38	71.50	71.57	74.68	7.09	7.22	7.53
R	1.84	0.83	7.59	0.61	1.05	7.23	0.79	0.33	0.25
优化组合	$A_1B_2C_3$			$A_1B_2C_3$			$A_3B_3C_2$		

表 4 方差分析

Tab.4 Variance analysis

差异源		方差	自由度	均方差	F	显著性
吸种孔平均 气流速度	A	5.53	2	2.77	26.64	*
	B	1.31	2	0.66	6.30	
	C	94.76	2	47.38	456.09	**
	误差	0.21	2	0.10		
	总和	101.81	8			
吸种孔最低 气流速度	A	0.60	2	0.30	72.60	*
	B	1.80	2	0.90	217.75	**
	C	87.13	2	43.57	10 540.5	**
	误差	0.01	2	0.00		
	总和	89.54	8			
吸种孔速度 标准差	A	1.10	2	0.55	56.78	*
	B	0.16	2	0.08	8.45	
	C	0.10	2	0.05	5.21	
	误差	0.02	2	0.01		
	总和	1.39	8			

注:显著性判断临界值为 $F_{0.01}(2,2)=99$, $F_{0.05}(2,2)=19$, $F_{0.1}(2,2)=9$; * 表示影响显著, ** 表示影响极显著;表中数据均进行四舍五入处理,但为保证准确,按原值计算。

综合极差分析与方差分析结果可知,针对吸种孔平均气流速度指标,负压口直径对该指标有极显著性影响,横向输气管直径对该指标有显著性影响,输气管夹角对该指标无显著性影响,因此该指标无需考虑因素 B ,最佳参数组合为 A_1C_3 。针对吸种孔最低气流速度指标,输气管夹角与负压口直径对该

指标有极显著性影响,横向输气管直径对该指标有显著性影响,且影响程度最大的因素为负压口直径,最佳参数组合为 $A_1B_2C_3$ 。针对吸种孔速度标准差指标,仅横向输气管直径对该指标有显著性影响,输气管夹角与负压口直径对该指标无显著性影响,因此该指标无需考虑因素 $B、C$,最优组为 A_3 。综合 3 项指标,因素 C 最佳为 C_3 ,因素 B 最佳为 B_2 ,因素 A 取值无法确定。

3.4.2 最佳参数组合确定

为进一步确定因素 A 的取值,利用指标隶属度算法^[30-31]进行计算

$$U=\frac{U_i-U_{\min}}{U_{\max}-U_{\min}}$$

(13)

式中 U ——指标隶属度

U_i ——第 i 组试验的指标值

$U_{\min}$ ——指标最小值 $U_{\max}$ ——指标最大值

对于吸种孔速度标准差指标而言,数值越小越好,因此对该指标的指标隶属度进行修正,其指标隶属度为 $1-U$ 。

播种机构应首要保证所有吸种孔均能够吸附种子,因此最重要的指标为吸种孔最低气流速度,该指标所占权重应远大于另两个指标,按照经验授予该指标 5 倍权重。其次要求各吸种孔的气流速度差异(吸种孔平均气流速度、吸种孔速度标准差)较小,提高气力利用效率。因此对吸种孔平均气流速度、吸种孔最低气流速度、吸种孔速度标准差赋予权重比为 1:5:1,该比例在计算 K 值及综合分时进行加权。则最优组计算如表 5 所示。

表 5 最优组计算

Tab.5 Optimal group calculation

试验号	A	B	C	平均速度 隶属度	最低速度 隶属度	速度标准 差隶属度	综合分
1	1	1	1	0.11	0.02	0	0.07
2	1	2	2	0.89	0.87	0.18	1.81
3	1	3	3	1	0.97	0.19	2.01
4	2	1	2	0.65	0.69	0.71	1.60
5	2	2	3	0.90	1	0.57	2.16
6	2	3	1	0	0	0.86	0.29
7	3	1	3	0.79	0.86	0.49	1.85
8	3	2	1	0.04	0.08	0.90	0.45
9	3	3	2	0.56	0.687	1	1.67
K_1	11.65						
K_2	12.12						
K_3	11.91						
最优组	A_2						

由表 5 可知,因素 A 隶属度最优取在 A_2 ,说明虽然在 3 项指标上 A_2 均不是最优组,但综合 3 个指

标来看, A_2 性能最优, 因此最佳参数组合为 $A_2B_2C_3$, 即正交试验第 5 组。该组的隶属度在 9 组正交试验中亦是综合得分最高组, 因此最佳参数组合是: 横向输气管直径为 8 mm, 输气管夹角为 105° , 负压口直径为 36 mm。在此参数下吸种孔平均气流速度为 86.4 m/s, 吸种孔最低气流速度为 75.16 m/s, 吸种孔速度标准差为 7.35 m/s。

3.4.3 各排吸种孔气流速度差异性分析

为保证 3 排播种需求, 各排横向与纵向气道长度不同, 导致各排气压有一定差异, 以最佳参数组为例, 对该差异进行分析, 3 排吸种孔气流速度如图 5 所示。

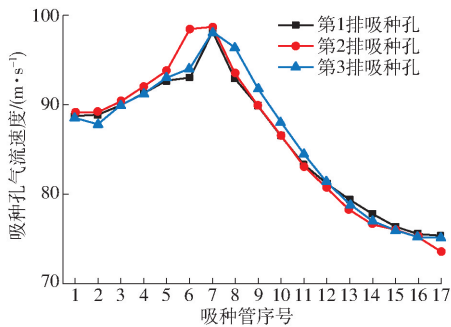


图5 吸种孔气流速度折线图

Fig. 5 Diagram of air velocity in suction hole

由图 5 可知, 3 排吸种孔仅在气流速度较高的几个吸种孔存在差异, 存在差异最大的为第 2 排第 6 孔, 但经过对该孔所处的位置关系进行分析, 产生差异的主要原因为第 2 排输气孔与第 1、3 排输气孔存在角度偏差, 更接近于负压口。因此从整体趋势看, 针孔吸种管分排所导致的气压差异不明显, 因此无需气压补偿。

最低点取在第 2 排第 17 吸种孔, 该吸种孔的上端输气孔仅有一半与气室相连, 造成了气流速度的下降, 但当仅有一半输气孔与气室连接时, 末端吸种孔气压并未出现显著的下滑, 仍保有吸种能力。

3.4.4 气压与气流速度分布

与气室联通的 51 根针孔吸种管的吸种孔压力与气流速度均存在显著的规律性。以最佳参数组合为例, 其压力与速度分布体渲染图如图 6、7 所示。

由图 6 可看出, 负压强度和吸种孔与负压口的距离呈显著正相关关系, 负压口附近的吸种孔负压强度及气流速度均处于较高水平, 随与负压口距离的增大, 呈下降趋势。由图 7 可知, 对速度产生最显著影响的是流体域截面积的改变, 无论是界面扩大或是缩小, 均会使速度发生突变, 最大速度取在吸种孔处, 亦是气道截面积最狭窄处。另一处气流速度升高处为气室, 推测是由于多管路气流汇聚流量增大, 各支路气流碰撞及与负压口距离较近等导致。

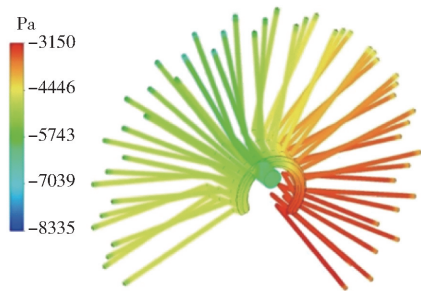


图6 压力分布体渲染图

Fig. 6 Volume rendering of pressure

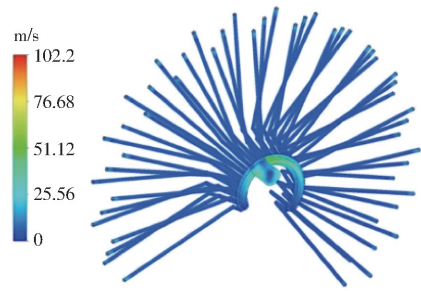


图7 速度分布体渲染图

Fig. 7 Volume rendering of velocity

4 试验与结果分析

4.1 试验材料及设备

按最佳参数组合(横向输气管直径为 8 mm, 输气管夹角为 105° , 负压口直径为 36 mm)加工试验样机。播种轮及气力分配中心盖等复杂关键部件使用 3D 打印技术进行加工, 材料为未来 8 000 低粘度光敏树脂, 种箱材料为透明光敏树脂, 悬挂架及轴利用机械加工方法制作。试验配套风机为德国好凯德 2HB320H36 型高压离心风机, 动力为 12 V 大扭矩直流电机, 变频器为 Rexroth VFC3610。播种机构样机及试验台如图 8 所示。试验所用小麦种子材料为烟农 19, 千粒质量 46.5 g。为消减针孔吸种管逐一穿越种箱时产生的周期式冲击振动, 将每排针孔吸种管相连, 起到占位作用, 不影响内部气场。

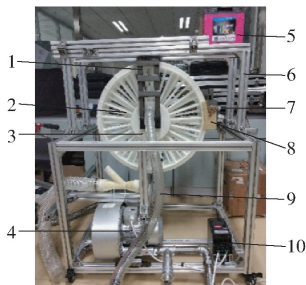


图8 样机及试验台

Fig. 8 Prototype and test bed

1. 悬挂架 2. 播种轮 3. 气力分配中心盖 4. 高压风机 5、7. 直流电机 6. 试验台架 8. 种箱 9. 负压管 10. 变频器

4.2 试验方法

由于吸种孔狭小, 使用风速仪难以准确测量该

处风速,且仿真中发现,输气管中的气流速度与吸种孔处的气流速度趋势一致,因此测量输气管内气流速度以衡量吸种孔气流速度。播种轮加工时,每排输气管距圆心 250 mm 处留有 1 个测量孔,将风速仪伸入测量孔中可获取该位置输气管内气流速度,插入后使用热熔胶封闭测量孔,防止漏气。测试时,给定负压接口真空度为 6 kPa,旋转播种轮,记录不同位置风速,由于测量风速时,数值存在一定波动,为提高试验精度,试验重复 10 次,取各指标平均值。

4.3 试验结果与分析

3 排输气管内气流速度仿真值与试验值如图 9 所示。

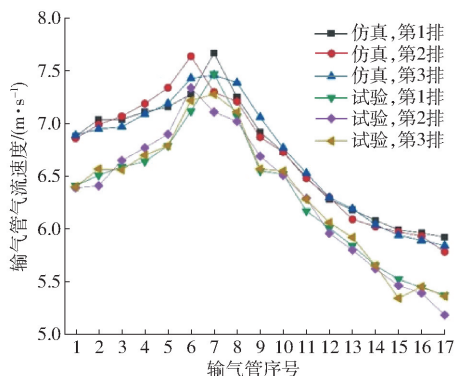


图9 输气管内气流速度折线图

Fig.9 Diagram of airflow velocity in air pipeline

试验结果与仿真结果相比整体偏低,主要因为:机构无法如数值分析保证绝对的气密性;当风速仪的探头伸入输气管内时,相当于人工植入了一个障碍物,也会对气流产生影响;气力负压输入的设定值是按照频率比等于负压的比平方计算得来,将对应 6 kPa 的频率输入变频器,实际负压口的负压经

测量略小于 6 kPa,但为杜绝负压测量误差,仍按照理论值开展试验,因此风机标牌的负压输出与实际负压输出存在的差距也可能导致负压供给偏小。

但仿真结果与试验结果整体趋势大致相同,均在负压口附近取得较高的气流速度,证明仿真分析的可靠性。仿真折线较试验折线更为平滑,显示在试验测量气流速度时可能存在一定误差。本试验采用热敏式风速仪,每组试验虽进行了多次测量,试验折线仍欠平滑,若能够使用高灵敏度风速测量仪器,则能够减少测量误差。试验中 3 排输气管内气流速度并未表现出显著的差异性,说明不同排次分布对气力耗损影响不大,与仿真分析结果一致。

5 结论

(1)建立了针孔管式小麦匀播机构的流体域模型,通过对变截面狭长圆柱区域、输气管弯折区域、气室汇流区域及负压口-气室连接区域的气力分析,得出影响流体域气力损耗的关键因素为横向输气管直径、输气管夹角、负压口直径。

(2)通过正交仿真试验,得出气力损耗最小的参数组合为:横向输气管直径 8 mm、输气管夹角 105°、负压口直径 36 mm。在此参数组合下,吸种孔平均气流速度为 86.4 m/s,吸种孔最低气流速度为 75.16 m/s,吸种孔速度标准差为 7.35 m/s。

(3)数值分析显示,吸种孔排次所导致的气压差异不明显,对气流速度产生显著影响的是流体域截面积的改变。样机试验结果相较于仿真结果略小,但趋势一致,证明了数值分析的可靠性。

参考文献

- [1] BELENKOV A I, TYUMAKOV A Y, SABO U M. Implementation of precision farming elements in the field experiment[J]. Zemledelie, 2015(3): 37-39.
- [2] 樊高琼,郑亭,陈溢,等. 耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦群体质量和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊): 20-25.
FAN Gaoqiong, ZHENG Ting, CHEN Yi, et al. Effects of tillage managements, sowing depth and soil-covering on population quality and yield of mechanical sowing wheat under relay intercropping condition[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.): 20-25. (in Chinese)
- [3] IACOMI C, POPESCU O. A new concept for seed precision planting[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015, 6: 38-43.
- [4] LIN H, YI C, LIU Z. Experimental study on quadruped wheel robot for wheat precision seeding[J]. Key Engineering Materials, 2016, 693: 1651-1657.
- [5] LIN H, DONG S, LIU Z, et al. Study and experiment on a wheat precision seeding robot[J]. Journal of Robotics, 2015, 696301: 1-9.
- [6] 陈雨海,余松烈,于振文. 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 730-734.
CHEN Yuhai, YU Songlie, YU Zhenwen. Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 730-734. (in Chinese)
- [7] 陈雨海,余松烈,于振文. 小麦边行优势及其利用的研究[J]. 耕作与栽培, 2002(6): 3-4.
- [8] 余松烈,杨文钰,史春余,等. 激发作物植株活力、改变植株生理机制的栽培技术研究[J]. 山东农业科学, 2009, 16(3): 1-7.
YU Songlie, YANG Wenyu, SHI Chunyu, et al. Studies on cultivation technologies for energizing crop plant and altering physiological mechanism[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, 16(3): 1-7. (in Chinese)
- [9] 赵秉强,余松烈,李凤超,等. 带状种植小麦带型—群体—产量相关规律的研究[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 33-39.
ZHAO Bingqiang, YU Songlie, LI Fengchao, et al. Studies on correlation of strip type—seed rate—yield of strip planting wheat

- [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(3): 33–39. (in Chinese)
- [10] 刘俊孝, 王庆杰, 李洪文, 等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 10–18. LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and seed suction performance of pinhole-tube wheat precision seeding device[J]. *Transactions of CSAE*, 2019, 35(11): 10–18. (in Chinese)
- [11] LEI X, LIAO Y, LIAO Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 131: 29–39.
- [12] LEI X, LIAO Y, ZHANG Q, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 98–109.
- [13] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 57–68. LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 57–68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170307&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007. (in Chinese)
- [14] 杨善东, 张东兴, 高振强, 等. 侧正压玉米排种器流场模拟与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(增刊): 35–39. YANG Shandong, ZHANG Dongxing, GAO Zhenqiang, et al. Flow field simulation and working parameters analysis of side positive pressure maize seeding device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(Suppl.): 35–39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.006. (in Chinese)
- [15] 赵晓顺, 于华丽, 张晋国, 等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 48–51, 74. ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 48–51, 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130210&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.010. (in Chinese)
- [16] 赵晓顺, 于华丽, 马跃进, 等. 负压式小麦精量排种器参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 11–18. ZHAO Xiaoshun, YU Huali, MA Yuejin, et al. Parameter optimization and experiment of negative pressure precision seed-metering device for wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(11): 11–18. (in Chinese)
- [17] 颜秋艳. 气力式一器双行精量排种器气室流场的仿真与试验[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(5): 567–572. YAN Qiuyan. Simulation and experiment of flow field in the chamber of pneumatic double-row precision metering device[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2016, 42(5): 567–572. (in Chinese)
- [18] 莫少嘉, 左超平, 姜峰. 蒸汽发生器流量分配板及横向流局部压力损失系数计算[J]. *原子能科学技术*, 2015(6): 1039–1044. MO Shaojia, ZUO Chaoping, JIANG Feng. Calculation of local pressure loss coefficient for flow distribution baffle and cross flow in steam generator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015(6): 1039–1044. (in Chinese)
- [19] BERNARDI C, DIB S, GIRAULT V, et al. Finite element methods for Darcy's problem coupled with the heat equation[J]. *Numerische Mathematik*, 2018, 139(2): 315–348.
- [20] 阙兴贵, 苏琳, 杨志伟, 等. 消防水带压力损失的影响因素及计算方法研究[J]. *上海理工大学学报*, 2016, 28(6): 561–565. QUE Xinggui, SU Lin, YANG Zhiwei, et al. Research on influencing factors of fire hose's pressure loss and its calculation method[J]. *J. University of Shanghai for Science and Technology*, 2016, 28(6): 561–565. (in Chinese)
- [21] 李中华, 王德成, 刘贵林, 等. 正压式气流排种器排种效果试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 89–93. LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Experimental study on sowing seeds by air-stream metering mechanism[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1): 89–93. (in Chinese)
- [22] 郭永鑫, 杨开林, 郭新蕾, 等. 基于表面粗糙度参数的管道当量粗糙度快速评测[J]. *水利学报*, 2018, 49(2): 178–185. GUO Yongxin, YANG Kailin, GUO Xinlei, et al. Quick evaluation of the pipeline equivalent sand-grain roughness based on the surface roughness parameters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(2): 178–185. (in Chinese)
- [23] 韩占忠, 王国玉. *工程流体力学基础*[M]. 2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 93–97.
- [24] 茅泽育, 赵凯, 赵璇, 等. 管道汇流口局部阻力试验研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 812–818. MAO Zeyu, ZHAO Kai, ZHAO Xuan, et al. Experimental study on local flow resistance at junctions of circular pipes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 812–818. (in Chinese)
- [25] 沈燕良, 王建平, 曹克强. 大孔径限流装置损失特性分析[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2001, 2(1): 10–12. SHEN Yanliang, WANG Jianping, CAO Keqiang. Loss property analysis of throttle with large aperture[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2001, 2(1): 10–12. (in Chinese)
- [26] SALIKOV V, ANTONYUK S, HEINRICH S, et al. Characterization and CFD-DEM modelling of a prismatic spouted bed[J]. *Powder Technology*, 2015, 270: 622–636.
- [27] 张涛, 朱晓军, 彭飞, 等. 近壁面处理对湍流数值计算的影响分析[J]. *海军工程大学学报*, 2013, 25(6): 104–108. ZHANG Tao, ZHU Xiaojun, PENG Fei, et al. Analysis of effect of near-wall treatments on numerical computation of turbulent flow[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2013, 25(6): 104–108. (in Chinese)
- [28] 胡坤, 胡婷婷, 马海峰. *ANSYS CFD 入门指南——计算流体力学基础及应用*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 109.
- [29] WEBSTER R, LARK R M. Analysis of variance in soil research: examining the assumptions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70: 990–1000.
- [30] 刘华文, 姚炳学. 区间数多指标决策的相对隶属度法[J]. *系统工程与电子技术*, 2004(7): 903–905. LIU Huawen, YAO Bingxue. Relative membership degree method for multiple attribute decision-making with intervals[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2004(7): 903–905. (in Chinese)
- [31] 房向荣, 周宏安. 基于理想解的区间数多属性决策的相对隶属度法[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 24(4): 99–102. FANG Xiangrong, ZHOU Hongan. Relative membership degree method for solving multi-attribute decision-making problem based on ideal solution[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2009, 24(4): 99–102. (in Chinese)