

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.008

# 射流式水田株间除草装置设计与试验

王金武 闫东伟 王奇 唐汉 王金峰 周文琪

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 针对水田株间除草作业劳动强度大、株间除草率低、易损伤秧苗等问题, 提出一种水射流除草方法, 以此设计了一种射流式株间除草装置。首先通过理论分析与参数计算确定了射流倾角为  $31^\circ$ , 喷嘴直径为  $0.004\text{ mm}$ , 运用动量守恒定理、粘性流体力学和土力学原理进行分析, 建立了喷嘴临界破土压力模型, 得出喷嘴临界破土压力为  $0.53\text{ MPa}$ 。进行水稻根系抗冲断极限水压试验, 确定了喷嘴出口压力上限为  $1.5\text{ MPa}$ 。进行台架试验, 选取装置前进速度和喷嘴出口压力为试验因素, 以除草率为试验指标, 采用二次正交旋转组合设计, 建立了试验指标与影响因素回归模型。运用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据分析并进行验证试验, 结果表明, 当装置前进速度为  $0.3\text{ m/s}$ , 压力为  $1.5\text{ MPa}$  时, 除草率为  $90.62\%$ 。满足水田机械除草作业农艺和技术要求。

**关键词:** 稻田; 杂草; 株间除草; 射流式

中图分类号: S224.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0078-08

OSID:



## Design and Experiment of Jet-type Paddy Field Weeding Device between Plants

WANG Jinwu YAN Dongwei WANG Qi TANG Han WANG Jinfeng ZHOU Wenqi

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high labor intensity of weeding operations, the low weeding rate inter-plants and the seedling damage in transplanting rice field, a new method of weeding by water jet between plants in complex paddy field environment was proposed. Based on the water jet weeding method and the mechanical structure design, a jet type inter-plant weeding device was designed. Firstly, by analyzing the structural characteristics of rice seedlings, weed roots and submerged water jet, the injector angle was determined to be  $31^\circ$  and the diameter parameters of the injector was determined to be  $0.004\text{ mm}$  through theoretical analysis and parameter calculation. Combined with the momentum conservation theorem, the viscous fluid mechanics, and the soil mechanics analysis, the critical failure condition model of soil was established, and the critical pressure of earth breaking of the injector was obtained to be  $0.53\text{ MPa}$ . The extreme water pressure test of rice root system anti-breaking was carried out, and the maximum pressure limit of injector outlet was determined to be  $1.5\text{ MPa}$ . Besides, the bench test was carried out, the forward speed of the device and the pressure of the injector outlet were selected as the test factors, the weeding rate was used as the test index. Both the test index and the influencing factor regression model were established by using the method of secondary orthogonal rotation combination design. The Design-Expert 8.0.6 software was used to analyze and verify the test data, the results showed that when the forward speed of the device was  $0.3\text{ m/s}$  and the pressure was  $1.5\text{ MPa}$ , the weeding rate was  $90.62\%$ . The device can meet the agronomic and technical requirements of paddy field mechanical weeding operations.

**Key words:** paddy field; weed; weeding between plants; jet-type

收稿日期: 2021-07-21 修回日期: 2021-09-01

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51875098)、国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01-44)和黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系岗位专家项目

**作者简介:** 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com

**通信作者:** 周文琪(1989—),男,副教授,博士,主要从事田间作业机械研究,E-mail: zhouwenqi1989@163.com

## 0 引言

水田杂草是农业水田生态系统的重要组成部分,但据联合国粮农组织(FAO)数据显示,近5年中国因草害引起的水稻产量损失率达13%左右<sup>[1]</sup>。随着绿色农业的发展,常用的化学除草所造成的农药残留和环境污染问题日趋严重,绿色高效的机械除草方式成为提高粮食品质和保证水稻安全的主要途径,行间除草技术和装备经过多年的研究和推广已较为成熟<sup>[2-6]</sup>,株间除草技术和装备的研制成为完善水田机械化除草的技术难点。

日本对株间除草的研究处于领先水平,日本美善公司和洋马公司研制的株间伞状除草盘,以旋转方式除去株间杂草,作业效率较高,但伤苗率也较高<sup>[7-8]</sup>。久保田和井关公司研制的摆动梳齿式株间除草部件,作业时除草部件随机具前进方向左右摇摆,对株间杂草进行去除,作业效率较高,但除草率较低,平均除草率仅40%<sup>[9]</sup>。国内专家学者在水稻株间除草方面也作了相关研究。华南农业大学利用除草爪齿余摆运动原理研制的水田株间机械除草装置<sup>[10]</sup>,东北农业大学研制的主动式螺旋弹齿株间除草盘<sup>[11-12]</sup>和农业农村部南京农业机械化研究所研制的主动摆动除草刀齿<sup>[13]</sup>,分别通过引导换轨旋转、弹齿盘的主动旋转和关键部件主动往复摆动实现株间除草,但上述装置均存在伤苗现象。为降低机械除草的伤苗率,将图像识别和自动控制等技术应用于水田除草装备中,由于水田杂草、秧苗交错生长和水面反光环境等干扰因素,株间除草避苗准确度一直未得到有效解决,且刚性的机械除草部件易造成秧苗损伤<sup>[10,14-16]</sup>。

针对水田株间除草作业劳动强度大、株间除草率低、易损伤秧苗等问题,本文设计一种射流式水田株间除草装置。根据中耕期水稻植株和杂草物理特性确定射流倾角和喷嘴开口直径,运用动量守恒定律、粘性流体力学和土力学原理建立喷嘴破土临界压力模型,通过台架多因素试验获得装置最优参数组合,并验证其工作性能。

## 1 水田株间除草作业环境

黑龙江省6月上旬后气温升高,光照足,杂草生长迅速,为杂草的危害高峰期,最佳除草作业时间为水稻移栽后7~14 d。水田除草环境包括稗草、秧苗、土壤、水等,土壤可细分为3层,即泥浆层、泥土层和犁底层,其中泥浆层较为稀软,根据文献<sup>[2,5]</sup>实际测定的数据可知,泥浆层深度 $h_1$ 为0.02~0.05 m;泥土层深度 $h_2$ 为0.18~0.20 m。黑龙江省水稻种

植行距 $H_1$ 为0.3 m,株距 $H_2$ 为0.01~0.15 m,插秧深度 $h_3$ 为0.015~0.02 m,水稻扎根深度 $h_4$ 为0.08~0.10 m;此时稗草多为单根,根部多生长于泥浆层,扎根深度 $l$ 为0.008~0.03 m。水田株间除草作业环境如图1所示。

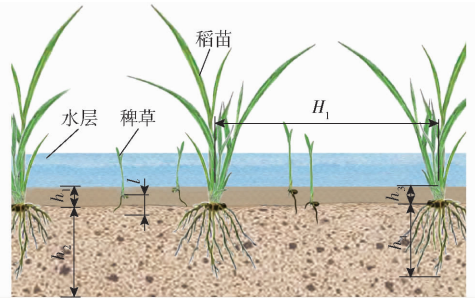
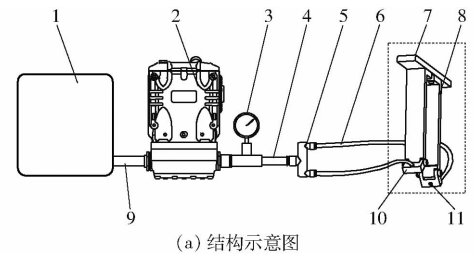


图1 水田株间除草作业环境

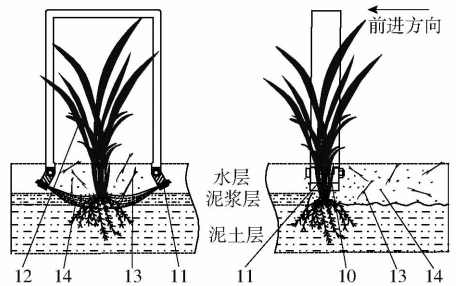
Fig. 1 Distribution of rice and weed roots in paddy soil

## 2 射流式除草装置结构与工作原理

射流式水田除草装置结构如图2所示。主要由水箱、柱塞泵、供水管路、射流架、喷嘴安装块等部分组成。柱塞泵与水箱通过吸水管进行连接,压力表安装于柱塞泵出水口处,后接输水总管与三通阀,三通阀通过输水支管与装在喷嘴安装块上的喷嘴连接。射流架固定于安装架上,喷嘴安装块对称分布于射流架左右两侧。



(a) 结构示意图



(b) 工作原理图

图2 射流式除草装置结构和工作原理图

Fig. 2 Structure diagrams of jet weeding device

1. 水箱 2. 柱塞泵 3. 压力表 4. 输水总管 5. 三通阀 6. 输水支管 7. 安装架 8. 射流架 9. 吸水管 10. 喷嘴安装块 11. 喷嘴 12. 秧苗 13. 杂草 14. 土壤破碎核

工作时,喷嘴以一定倾斜角安装于射流架上,对称置于秧苗两侧并临近水层下泥面。柱塞泵在动力源驱动下吸取水箱内水,并进行增压增速,然后经输水管路传递至安装于射流架左右两侧的喷嘴,喷射

向株间杂草依附生长的土壤层,土壤层被冲蚀破碎成更小的土块颗粒或直接溶于表层水中,株间杂草根系因依附土壤的消失而失去支撑力,随周边破碎的土壤颗粒沿射流冲蚀方向被水流卷走。之后杂草根系因脱离与水田土壤的连接,在浮力作用下漂浮于水层表面,完成除草作业。由于水田土壤的分层现象以及水稻根系与杂草根系扎根深度的差异,在一定打击力和射流倾角下,射流冲蚀实现对土壤特定深度和宽度的挖掘,即可完成除草作业,又不会影响和破坏水稻苗根系的稳固性。

### 3 射流式水田株间除草装置设计

#### 3.1 射流倾角

射流倾角直接影响射流对土壤冲蚀破坏的区域范围,从而影响除草效果。水田行间的除草作业,受限于水稻根系生长宽度,为避免行间除草轮对水稻根系造成损伤,除草部件的设计宽度在 0.2 m 以内,剩余 0.1 m 宽区域即为株间除草范围。插秧两周后,杂草根系为单根,扎根深度  $l$  为 0.008 ~ 0.03 m,根系主要生长于稀软的泥浆层;水稻扎根深度 0.08 ~ 0.10 m,根系已深入结构更为致密的泥土层。射流式水田除草装置的除草作业过程如图 3 所示,射流倾角的选择既要满足株间除草作业宽度要求,也要满足除草深度要求。

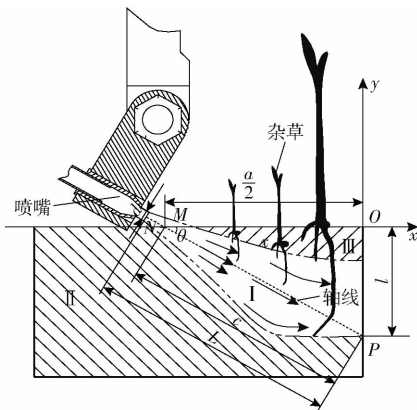


图3 除草深度和射流倾角关系示意图

Fig. 3 Relationship between weeding depth and jet inclination angle

I. 射流冲蚀区 II. 未除草区域 III. 塌陷区域

以  $O$  为原点,以泥浆层上表面水平方向为  $x$  轴,以地面垂直方向为  $y$  轴,建立坐标系,如图 3 所示。以杂草扎根深度为目标除草深度,射流倾角、除草宽度和除草深度(等于杂草扎根深度)之间的关系为

$$\tan\theta = \frac{l}{\frac{a}{2}} \quad (1)$$

式中  $a$ ——株间除草宽度, m

$\theta$ ——射流与  $x$  轴方向夹角, ( $^{\circ}$ )

已知  $a = 0.1 \text{ m}$ ,  $l$  为 0.008 ~ 0.03 m, 易得

$$0.04 \leq \tan\theta \leq 0.6 \quad (2)$$

求解可得射流倾角取值范围为  $10^{\circ} \leq \theta \leq 31^{\circ}$ 。杂草扎根深度在 0.008 ~ 0.03 m 之间,为满足除草作业需求,  $l$  取最大值 0.03 m, 此时射流倾角为  $31^{\circ}$ 。

#### 3.2 喷嘴直径

射流式水田株间除草装置的射流工作环境为淹没水环境,喷嘴开口直径影响淹没水射流有效靶距范围,选择合适喷嘴直径和靶距范围可大幅提高射流工作效率并减少能耗。

在其他条件相同的工况下,圆形喷嘴比其他异形出口喷嘴喷射的射流速度和湍动能更高,其冲击靶板瞬间产生的隆起区域最广,由此诱导产生的中心冲击压力和打击冲蚀能力更强<sup>[17-18]</sup>。根据文献[19],对于圆形喷嘴,在有效靶距范围内,淹没水射流的冲蚀性能随靶距的增加呈现先增大后减小趋势,有效靶距  $L$  的范围与喷嘴直径存在关系

$$5d \leq L \leq 20d \quad (3)$$

式中  $d$ ——喷嘴直径, m

为充分发挥除草装置淹没水射流对杂草根系所在土壤层的冲蚀性能,且本着流量最小原则,淹没水射流冲蚀路径长度应小于淹没水射流有效靶距长度,由图 3 可知

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 + l^2 = c^2 \quad (4)$$

$$c \leq 15d \quad (5)$$

式中  $c$ ——淹没水射流冲蚀土壤长度, m

将已知参数  $a = 0.1 \text{ m}$ ,  $l = 0.03 \text{ m}$  代入式(3) ~ (5)可得  $d \geq 0.004 \text{ mm}$ , 喷嘴直径  $d = 0.004 \text{ m}$ , 有效靶距  $L \approx 0.058 \text{ m}$ 。

#### 3.3 喷嘴出口压力

射流式株间除草装置的水下除草性能取决于淹没水射流的打击力是否大于杂草根系生长土壤层的土壤临界破坏压力。为探究射流式株间除草装置淹没水射流破土所需喷嘴出口压力  $p_0$ , 对淹没水射流除草作业过程进行受力分析。

如图 4 所示,除草作业过程中,淹没水射流以一定倾斜角度打击土体表面,之后射流方向改变,并损失一部分动量,此部分能量以作用力形式传递到被破坏土壤表面上。水射流对株间生长杂草区域内土壤的冲蚀打击作用,将杂草剥离其生长依附的土壤环境,之后杂草和被破碎的土壤沿着射流冲蚀方向被裹挟冲离,从而完成除草作业。除草作业前后动

量的改变是由淹没水射流与土壤间的相互作用力引起的,假设此过程中连续淹没水射流对土壤表面的作用力为  $F$ ,且此作用力稳定。

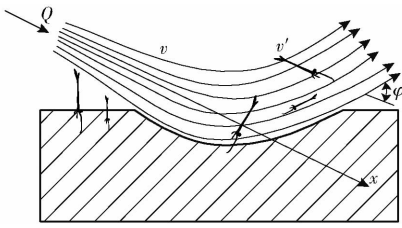


图 4 水射流不同角度冲蚀土壤表面示意图

Fig. 4 Water jet erosion of soil surface at different angles

根据动量守恒定理得

$$F\Delta t = mv - mv' \quad (6)$$

式中  $m$ ——水质量,kg

$\Delta t$ ——时间变化量,s

$v$ ——淹没水射流冲击土壤前的流速,m/s

$v'$ ——淹没水射流冲击土壤后的流速,m/s

假设淹没水射流冲击土壤前后前进方向改变角度为  $\varphi$ ,前进速度大小不变,淹没射流作用在土壤表面的力为

$$F = \rho Qv - mQv' \cos\varphi = \rho Qv(1 - \cos\varphi) \quad (7)$$

式中  $\rho$ ——水密度,kg/m<sup>3</sup>

$Q$ ——水射流流量,m<sup>3</sup>/s

根据射流的对称性易得  $\varphi \approx 2\theta$ 。由动量定理可得,射流动量  $J = \rho Qv$ ,代入公式(7)可得

$$F = J(1 - \cos(2\theta)) \quad (8)$$

已知射流式株间除草装置对水田土壤的破坏作用主要取决于淹没水射流对土壤作用断面上单位面积的打击力,故对除草装置淹没水射流沿程不同靶距打击区域内单位面积上的打击力及其分布情况进行分析。装置在水田环境作业,受淹没水射流的扩散以及周围液体阻力等因素影响,沿水射流方向射流半宽  $b$  随靶距增加逐渐增大,轴心最大流速  $v_{x,max}$  随靶距增加逐渐减小,如图 5 所示。

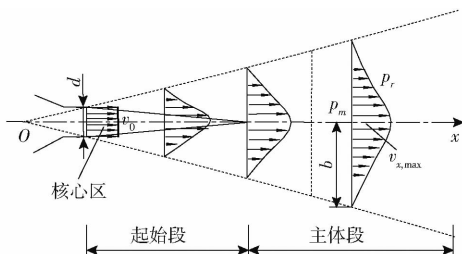


图 5 淹没水射流结构示意图

Fig. 5 Submerged water jet structure

通过分析射流沿靶距方向上横截面的动压分布来分析单位面积淹没水射流对水田杂草根系所在土壤层的打击力。根据伯努利能量守恒定律可得淹没水射流断面轴心处的动压分布为

$$p_m = \frac{1}{2}\rho v_{x,max}^2 \quad (9)$$

式中  $p_m$ ——淹没水射流截面上射流轴心动压,MPa

由粘性流体力学理论<sup>[20]</sup>可得射流轴心最大速度

$$v_{x,max}^2 = \frac{3\alpha^2 J}{8\pi\rho\lambda_0 x} \quad (10)$$

其中

$$\alpha = \frac{\sqrt{3J}}{4\lambda_0 \sqrt{\pi\rho}}$$

式中  $\alpha$ ——常数

$\lambda_0$ ——运动涡黏度,常数

$x$ ——靶距,m

联立公式(9)、(10)可得

$$p_m = \frac{3\alpha^2 J}{8\pi} \frac{1}{x^2} \quad (11)$$

由式(11)可知,淹没水射流轴向断面上的轴心动压  $p_m$  随靶距  $x$  的增大而减小。以射流打击杂草所在土体表面时的截面作为研究对象,土壤被冲蚀的区域近似为圆盘形,如图 6 所示。在打击中心处,射流的轴心动压为  $p_m$ ;而打击范围内其他各点的压力  $p_r$ ,随着与中心径向距离的增大逐渐减小,直至等于周围环境压力,通常可认为是零。

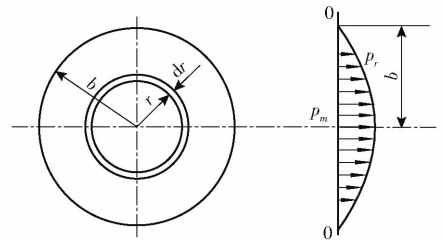


图 6 土壤受射流冲击面力的分布

Fig. 6 Distribution of soil impinging surface forces by water jet

运用量纲分析法<sup>[21]</sup>表示淹没水射流打击范围内各点压力,即

$$p_r = p_m f(\eta) \quad (12)$$

其中

$$\eta = r/b$$

式中  $\eta$ ——无量纲参数

$r$ ——淹没水射流打击处与轴心距离,m

根据淹没水射流沿轴心到射流边界的动压变化特点,函数  $f(\eta)$  应满足边界条件

$$\begin{cases} f(0) = 1 & f'(0) = 0 & (\eta = 0) \\ f(1) = 0 & f'(1) = 0 & (\eta = 1) \end{cases} \quad (13)$$

根据泰勒公式和公式(13)可得

$$f(\eta) = 2\eta^3 - 3\eta^2 + 1 \quad (14)$$

根据淹没水射流的轴对称型,设淹没水射流打击土壤的半径为射流半宽  $b$ ,如图 6 所示,将

式(11)、(14)代入式(12),并积分可得

$$F_b = \int_0^b p_m f(\eta) 2\pi dr = \frac{9\alpha^2 J b^2}{80x^2} \quad (15)$$

式中  $F_b$ —— $r=b$  时淹没水射流断面上对应的作用力, N

依据里夏特经验常数<sup>[20]</sup>, 将  $\alpha = 15.174$  代入式(15), 可得

$$F_b = 25.9 \frac{J b^2}{x^2} \quad (16)$$

在淹没水射流流动过程中流速逐渐降低, 作用面积逐渐增大, 由于射流周围环境流体中的压强不变, 因此在射流各断面上的压力均相等, 等于周围环境流体的压力。在此条件下, 总动量遵循动量守恒定理, 即总动量  $J$  在沿程各个断面上保持常量, 即

$$J = \int_A \rho v_x^2 dA = \rho Q v = \pi R_0^2 \rho v_0^2 \quad (17)$$

式中  $A$ ——淹没水射流作用断面的面积,  $m^2$

$v_x$ ——淹没水射流靶距  $x$  处流速,  $m/s$

$R_0$ ——喷嘴出口半径,  $m$

$v_0$ ——喷嘴出口流速,  $m/s$

对于连续射流, 喷嘴出口压力  $p_0$  与射流速度  $v_0$  存在关系

$$p_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad (18)$$

联立式(17)、(18), 可得

$$J = 2\pi p_0 R_0^2 \quad (19)$$

联立式(16)、(19), 可得

$$F_b = 51.8\pi p_0 R_0^2 \left(\frac{b}{x}\right)^2 \quad (20)$$

当射流倾角为  $\theta$  时, 射流式株间除草装置的淹没水射流实际作用在土壤上的力为

$$F = F_b (1 - \cos(2\theta)) \quad (21)$$

已知  $\theta = 31^\circ$ , 由此易得靶距  $x$  处土壤单位面积受力  $\bar{F}$  为

$$\bar{F} = \frac{F}{S_b} = 27.5 \frac{p_0 R_0^2}{x^2} \quad (22)$$

式中  $S_b$ —— $r=b$  时淹没水射流作用断面面积,  $m^2$

淹没水射流对杂草根系所在土壤层的破坏作用不仅与射流各项参数有关, 而且与被打击破坏土壤自身的物化性质有着密切的关系, 科研人员常借助试验手段对土壤临界破坏压力进行研究, 根据文献<sup>[22]</sup>, 单位面积土壤的临界破坏压力  $F_{cr}$  与土壤的抗剪强度、渗透性、土颗粒粒径以及土体的密度等参数有关, 即

$$F_{cr} = \zeta \tau_f^2 \left(\frac{d_{60}}{k}\right)^{-2} \frac{1}{\gamma_d} \quad (23)$$

式中  $\zeta$ ——修正系数, 取  $1.8 \times 10^{10}$ <sup>[22]</sup>

$\tau_f$ ——土壤抗剪强度,  $kPa$

$d_{60}$ ——土壤颗粒限定粒径,  $mm$

$\gamma_d$ ——土壤干容重,  $kN/m^3$

$k$ ——土壤渗透系数,  $m/s$

令  $\bar{F} \geq F_{cr}$ , 可得射流式株间除草装置除草作业

喷嘴临界破土压力  $p_c$  应满足

$$p_c \geq 2.125 \times 10^{12} \tau_f^2 \left(\frac{d_{60}}{k}\right)^{-2} \left(\frac{x}{R_0}\right)^2 \frac{1}{\gamma_d} \quad (24)$$

根据文献<sup>[23-24]</sup>, 取东北典型地区黏黑土壤参数( $\tau_f = 25 kPa$ ,  $d_{60} = 0.05 mm$ ,  $\gamma_d = 1.43 \times 10^7 kN/m^3$ ,  $k = 1.17 \times 10^{-6} m/s$ )代入。已知喷嘴直径为  $0.004 m$ ,  $x = L = 0.058 m$ , 得喷嘴临界破土压力  $p_c \geq 0.53 MPa$ 。根据喷嘴临界破土压力选取欧森 OS-80 型柱塞泵, 额定流量  $65 \sim 85 L/min$ , 额定压力  $0 \sim 6 MPa$  可调, 额定功率  $4 \sim 5.5 kW$ 。

## 4 台架试验

### 4.1 试验条件

试验于2021年5月在东北农业大学农牧机械实验室进行, 试验装置为射流式株间除草装置, 土壤类型为东北典型黏黑土, 土槽宽度  $0.6 m$ , 长度  $4 m$ , 泥脚深度  $0.16 \sim 0.18 m$ , 水层深度  $0.02 \sim 0.03 m$ 。为保证稗草根周围土壤结构强度与田间实况接近, 移栽杂草均带育苗土壤基质, 杂草随机扦插于土槽内除草区域, 扦插密度  $36 株/m^2$ , 扦插深度  $0.008 \sim 0.03 m$ 。

### 4.2 试验设计

#### 4.2.1 水稻根系抗冲断极限水压试验

为探究水稻根系抗冲断压力上限, 为后续试验因素水平选取提供依据, 进行单因素试验。因流体管路存在压力损失, 试验前, 通过在喷嘴出口上端安装压力表与柱塞泵出口处压力对比, 进行压力标定。试验情况如图7所示。

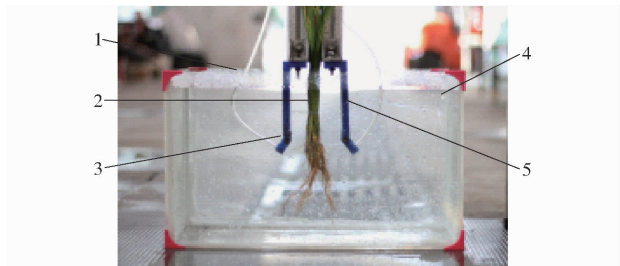


图7 水稻根系抗冲断极限水压试验

Fig. 7 Test of resistance to thrust of rice roots by water pressure limit

1. 射流管路 2. 水稻苗 3. 喷嘴 4. 水箱 5. 射流架



试验分别选取插秧后 7 d 和 14 d 的秧苗,进行水稻根系抗冲断极限水压试验。因土壤溶于水会造成水体混浊,不便于试验观察,故水稻根系抗冲断极限水压试验在根系脱离附着土壤情况下进行。试验时,将水稻根系淹没于透明玻璃箱水体中,固定水稻植株茎秆端,射流源对称分布于水稻根系两侧,间距 0.1 m,射流倾角  $\theta$  为  $31^\circ$ ,喷嘴定点静止喷射。根据以往研究经验,装置前进速度选定 0.26 ~ 0.54 m/s,测量水稻根系水中自然垂落宽度小于等于 0.02 m,根据根系垂落宽度和装置前进速度可算出冲蚀最大时间为 0.07 s,试验设定为 1 s。

#### 4.2.2 多因素试验

为探索射流式株间除草装置喷嘴出口压力、前进速度对除草率的影响规律,得到其最佳工作参数,进行台架试验。根据理论分析结果和单因素试验,合理制定前进速度  $x_1$  和喷嘴出口压力  $x_2$  取值范围。试验采用二因素五水平二次旋转组合设计,因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码  
Tab. 1 Coding of factors

编码	因素	
	前进速度 $x_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	喷嘴出口压力 $x_2 / \text{MPa}$
-1.414	0.26	0.53
-1	0.30	0.70
0	0.40	1.10
1	0.50	1.50
1.414	0.54	1.67

装置工作深度可调,调节射流喷嘴贴近泥面,行走电机和动力电机速度均由变频器控制。行走电机控制试验台车在土槽导轨上往复运动,动力电机通过带传动控制柱塞泵吸取水箱内水并进行增速增压,经管路流通至射流机构,喷向土槽内作业区域内杂草。当行走电机和动力电机同步进行工作时,即可完成射流式株间除草装置的除草动作。台架试验情况如图 8 所示。

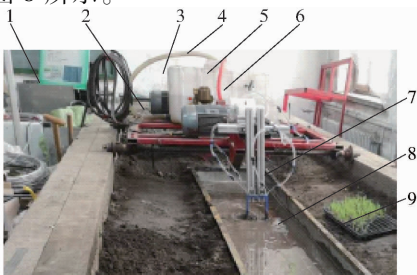


图 8 射流式株间除草装置台架试验

Fig. 8 Test platform of weeding device on performance

1. 变频器 2. 试验台车 3. 行走电机 4. 水箱 5. 柱塞泵 6. 动力电机 7. 射流机构 8. 秧苗 9. 土槽

#### 4.3 试验指标

水射流冲蚀作用位置位于水层下部,直接作用对象为根土复合体,未直接接触上端秧苗,伤苗率作为工作性能考核指标并不准确。目前国内外有评价除草率的统一标准,但尚无评价水田除草伤根率的统一标准。通过查阅相关文献及水田除草作技术要求<sup>[25-26]</sup>,选定伤根数和除草率作为试验的评价指标。

##### (1) 伤根数

水射流冲击水稻根系 1 s 后,对玻璃水槽内水稻断根数量进行统计,每组试验重复进行 5 次并求平均值,出现断根即判定为伤根。

##### (2) 除草率

选取试验矩形水槽区域为测试区,本文对未除去杂草的定义为根系完整,杂草茎叶折断损伤不严重,能够继续成活的杂草。除草率计算公式为

$$y = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (25)$$

式中  $y$ ——除草率, %

$Q_1$ ——除草前测试区杂草总数, 棵

$Q_2$ ——除草后测试区杂草总数, 棵

#### 4.4 试验结果

##### 4.4.1 水稻根系抗冲断极限水压试验

水稻根系抗冲断极限水压试验结果如图 9 所示。插秧 7 d 后水稻根系出现断根时压力为 1.5 MPa,插秧 14 d 后水稻根系出现断根时压力为 2 MPa,之后水稻断根数量皆随着压力的增加而增加。根据文献[27-28],水稻根系的根土共生结构更为稳固,根系抗剪抗拉强度小于根土共生结构下的抗剪抗拉强度。试验所获水稻根系脱离附着土壤下抗冲断极限水压小于水稻根系在根土共生状态下抗冲断极限水压,故选定喷嘴出口压力上限为 1.5 MPa 即可满足不伤根要求。

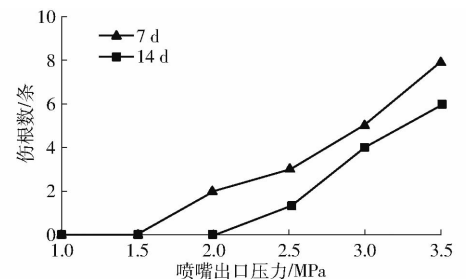


图 9 水稻根系抗冲断极限水压试验结果

Fig. 9 Test results of limit hydraulic pressure of rice root resistance to thrust

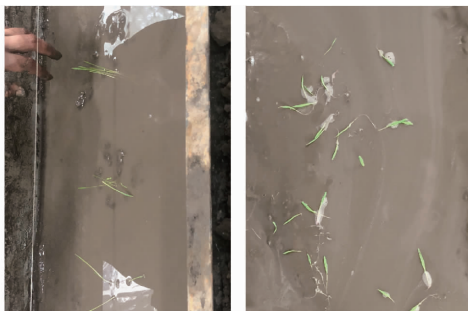
##### 4.4.2 多因素试验结果与分析

试验方案与结果如表 2 所示。除草前后效果如图 10 所示。

借助 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行

表2 台架试验结果  
Tab.2 Results of bed test

序号	因素		y/%
	$x_1/(m \cdot s^{-1})$	$x_2/MPa$	
1	0.30	0.70	76.67
2	0.50	0.70	72.82
3	0.30	1.50	95.33
4	0.50	1.50	78.67
5	0.26	1.10	85.86
6	0.54	1.10	73.34
7	0.40	0.53	68.20
8	0.40	1.67	82.62
9	0.40	1.10	72.62
10	0.40	1.10	70.27
11	0.40	1.10	73.60
12	0.40	1.10	71.36
13	0.40	1.10	70.38
14	0.40	1.10	73.67
15	0.40	1.10	71.65
16	0.40	1.10	70.32



(a) 除草前 (b) 除草后

图10 除草前后效果对比

Fig.10 Contrast effects before and after weeding

分析,进而得到相应的回归方程

$$y = 136.85 - 341.7x_1 + 9.21x_2 - 80.06x_1x_2 + 477.5x_1^2 + 16.75x_2^2 \quad (26)$$

为了直观地分析各试验因素与除草率指标间的关系,运用 Design-Expert 8.0.6 软件得各因素对性能指标影响的响应曲面,如图 11 所示。

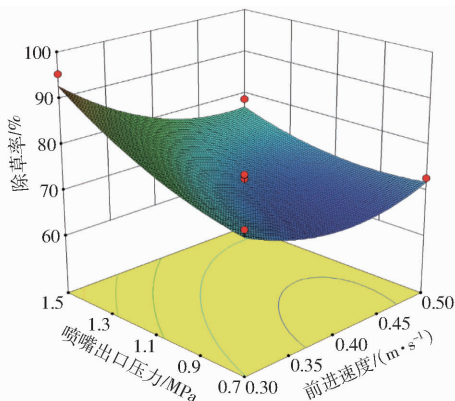


图11 因素交互作用对性能指标影响的响应曲面

Fig.11 Response surfaces of all factors on seeding qualified index

根据二次回归模型(式(26))和图11可知,前

进速度和喷嘴出口压力对除草率的影响极显著,前进速度和喷嘴出口压力存在交互作用。当前进速度一定时,除草率随着喷嘴出口压力的减小而降低。当喷嘴出口压力一定且处于低位时,随着前进速度的增加除草率先降低后升高,产生该现象的主要原因是:前进速度在 0.3 ~ 0.4 m/s 范围内变化时,单位面积土壤受冲蚀时间下降,除草率随之降低;当前进速度在 0.4 ~ 0.5 m/s 范围内变化时,由于前进速度增大,台架振动增大,导致株间除草装置的横向和纵向振幅增大,射流受振幅变化影响出现横向和纵向脉冲性喷射,冲蚀运移性能增强,故而除草率升高。当喷嘴出口压力一定且处于高位时,射流冲蚀能力强,随着台架前进速度的升高,除草区域内单位面积土壤受射流冲蚀的时间较少,对杂草根系生长土壤层剥离程度降低,除草率随之降低。

#### 4.5 优化及验证

为得到试验因素最优组合,结合各因素边界条件建立数学模型。对式(26)进行分析,其数学模型为

$$\begin{cases} \max y \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.3 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 0.5 \text{ m/s} \\ 0.7 \text{ MPa} \leq x_2 \leq 1.5 \text{ MPa} \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

运用 Design-Expert 8.0.6 软件中数据优化模块对回归方程模型进行优化求解,得到装置最优作业参数为:前进速度 0.3 m/s 和喷嘴出口压力 1.5 MPa,此参数组合下除草率为 92.78%。根据数据优化获得的参数进行台架试验验证。试验结果表明,除草率平均值为 90.62%,与优化结果基本一致。

#### 5 结论

(1)提出了一种水射流除草方法,基于此种方法设计了一种射流式水田株间除草装置,能有效清除水田株间杂草,该装置除草率高,伤苗率低,工作性能稳定,作业质量满足水田中耕除草作业要求。

(2)通过对水稻秧苗和杂草根系以及淹没水射流结构特点分析,结合动量守恒定理、粘性流体力学和土力学原理,获得射流倾角为 31°、喷嘴直径为 0.004 m,喷嘴临界破土压力为 0.7 MPa。

(3)进行水稻根系抗冲断极限水压试验,由试验结果可知喷嘴出口压力上限为 1.5 MPa。进行了台架试验,采用二因素五水平二次旋转组合设计方案进行试验设计,运用 Design-Expert 8.0.6 软件对回归模型进行优化、验证,在前进速度 0.3 m/s、喷嘴出口压力 1.5 MPa 时得到最优组合,除草率为 92.78%。台架验证试验除草率为 90.62%,试验值与理论值基本一致,除草作业指标均达到国家和行业标准要求。

## 参 考 文 献

- [1] 王金武,唐汉,王金峰,等.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):1-21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170501&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [2] 王金峰,高观保,闫东伟,等.水田电动双行深施肥除草机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):46-57. WANG Jinfeng, GAO Guanbao, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of electric control double row deep fertilizing weeder in paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 46-57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180706&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180706&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.006. (in Chinese)
- [3] PEREZRUIZ M, SLAUGHTER D C, GLIEVER C, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2012, 80: 41-49.
- [4] SCIALABBA N, LINDENLAUF M. Organic agriculture and climate change[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2010, 25: 158-169.
- [5] 王金峰,王金武,闫东伟,等.3SCJ-2型水田行间除草机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):71-78,202. WANG Jinfeng, WANG Jinwu, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of 3SCJ-2 type row weeding machine for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 71-78, 202. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170609&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170609&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.009. (in Chinese)
- [6] 齐龙,梁仲维,马旭,等.耙压式除草轮与水田土壤作用的流固耦合仿真分析及验证[J].农业工程学报,2015,31(5):29-37. QI Long, LIANG Zhongwei, MA Xu, et al. Validation and analysis of fluid-structure interaction between rotary harrow weeding roll and paddy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 29-37. (in Chinese)
- [7] 西脇健太郎,大谷隆二,中山壮一.機械除草と除草剤の部分散布を組み合わせたハイブリッド除草機[J].農業機械学会誌,2010,72(1):86-92.
- [8] TAJUDDIN A A. Development of a power weeder for low landrice[J]. Journal of the Institution of Engineers (India), 2009, 90(6): 15-17.
- [9] 王金武,马骁驰,唐汉,等.曲面轮齿斜置式稻田行间除草装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2021,52(4):91-100. WANG Jinwu, MA Xiaochi, TANG Han, et al. Design and experiment of curved-tooth oblique type inter-row weeding device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 91-100. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210409&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210409&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.009. (in Chinese)
- [10] JIANG Y, CUI H, QI L, et al. Recognition and positioning method of rice seedlings based on machine vision[J]. IJSIP, 2016, 9(9): 265-278.
- [11] 王奇,周文琪,唐汉,等.弧齿往复式稻田株间自动避苗除草装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2021,52(6):53-61,72. WANG Qi, ZHOU Wenqi, TANG Han, et al. Design and experiment of arc-tooth reciprocating motion type seedling avoided weeding control device for intertillage paddy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 53-61, 72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210606&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210606&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.006. (in Chinese)
- [12] 陶桂香,王金武,周文琪,等.水田株间除草机械除草机理研究与关键部件设计[J/OL].农业机械学报,2015,46(11):57-63. TAO Guixiang, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Herbicidal mechanism and key components design for paddy weeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 57-63. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151109&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151109&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.009. (in Chinese)
- [13] 吴崇友,张敏,金诚谦,等.2BYS-6型水田中耕除草机设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(7):51-54. WU Chongyou, ZHANG Min, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of 2BYS-6 type paddy weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 51-54. (in Chinese)
- [14] 蒋郁,崔宏伟,区颖刚,等.基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):23-31,49. JIANG Yu, CUI Hongwei, OU Yinggang, et al. Positioning method of rice seedlings based on edge fitting in separated region of stem base[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 23-31, 49. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170603&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170603&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.003. (in Chinese)
- [15] 陈学深,黄柱健,马旭,等.水稻机械除草避苗控制系统设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(1):386-396. CHEN Xuoshen, HUANG Zhujian, MA Xu, et al. Design and test of control system for rice mechanical weeding and seedling-avoiding control[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 386-396. (in Chinese)
- [16] 胡炼,罗锡文,曾山,等.基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J].农业工程学报,2013,29(10):12-18. HU Lian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12-18. (in Chinese)
- [17] 黄飞,胡斌,左伟芹,等.不同形状喷嘴的高压水射流冲击力特性实验[J].重庆大学学报,2019,42(9):124-133. HUANG Fei, HU Bin, ZUO Weiqin, et al. Experiments on the impact pressure of high-pressure water jet under different nozzle shapes[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(9): 124-133. (in Chinese)



- mechanical test[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 44(5):559-564. (in Chinese)
- [19] 青苡任,李耀明,马征,等. 油菜角果抗裂角性二自由度碰撞测试方法研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5):33-40. QING Yiren, LI Yaoming, MA Zheng, et al. Technology of 2-DOF collision testing for rape pod shatter resistance[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(5):33-40. (in Chinese)
- [20] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(4):113-123. FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of low-damage combined corn threshing and separating device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4):113-123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190413&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190413&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.013. (in Chinese)
- [21] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [22] 蔡超杰,陈志,韩增德,等. 种子玉米生物力学特性与脱粒性能的关系研究[J]. *农机化研究*, 2017, 39(4):192-196. CAI Chaojie, CHEN Zhi, HAN Zengde, et al. Study on relationship of biomechanical characteristics of corn seed and threshing performance[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(4):192-196. (in Chinese)
- [23] 耿端阳,谭德蕾,于兴瑞,等. 玉米柔性脱粒滚筒脱粒元件设计与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(5):1923-1933. GENG Duanyang, TAN Delei, YU Xingrui, et al. Design and test of corn flexible threshing cylinder element[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2020, 50(5):1923-1933. (in Chinese)
- [24] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [25] 谢方平,罗锡文,苏爱华,等. 刚性弓齿与杆齿及柔性齿的脱粒对比试验[J]. *湖南农业大学学报(自科版)*, 2005, 31(6):648-651. XIE Fangping, LUO Xiwen, SU Aihua, et al. Contrastive experiment on threshing by using rigid wire-loop, rigid pole tooth and flexible pole tooth[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 31(6):648-651. (in Chinese)
- [26] TANG Z, ZHANG H, ZHOU Y. Unbalanced vibration identification of tangential threshing cylinder induced by rice threshing process[J]. *Shock and Vibration*, 2018: 1-14.
- [27] HOSTENS I, RAMON H. Descriptive analysis of combine cabin vibrations and their effect on the human body[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(3): 453-464.

## (上接第 85 页)

- [18] 张东速,韦朝坤,唐珊珊,等. 高压水射流靶物探测用喷嘴结构参数优化[J]. *流体机械*, 2014, 42(9):35-38, 18. ZHANG Dongsu, WEI Chaokun, TANG Shanshan, et al. Nozzle structure parameters of the optimal to high pressure water jet target detection[J]. *Journal of Fluid Machinery*, 2014, 42(9): 35-38, 18. (in Chinese)
- [19] 胡寿根,朱美洲,蒋澄. 淹没水射流冲蚀性能试验研究[J]. *机械工程学报*, 1997, 33(3):44-48. HU Shougen, ZHU Meizhou, JIANG Cheng. Experimental study on erosion performance with submerged water jet[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1997, 33(3): 44-48. (in Chinese)
- [20] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [21] 杨艳,陈华,黄宏亮,等. 水力分析与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016:10-13.
- [22] 李范山,杜嘉鸿,施小博,等. 射流破土机理研究及其工程应用[J]. *流体机械*, 1997(2):26-29.
- [23] 何煦,桑琦明,郑粉莉,等. 东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1):103-109, 115. HE Xu, SANG Qiming, ZHENG Fenli, et al. An experimental study on impact of multiples agent actions on sloping water erosion in different mollic thickness regions of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1):103-109, 115. (in Chinese)
- [24] 王子龙,常广义,姜秋香,等. 灰色关联及非线性规划法构建传递函数估算黑土水力参数[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10):60-68. WANG Zilong, CHANG Guangyi, JIANG Qiuxiang, et al. Constructing pedo-transfer functions based on grey relational and nonlinear programming to estimate hydraulic parameters in black soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(10):60-68. (in Chinese)
- [25] 董明辉,赵步洪,陈培峰,等. 机插方式对杂交粳稻碳氮调节与颖花形成及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13):65-73. DONG Minghui, ZHAO Buhong, CHEN Peifeng, et al. Effects of machine insertion on carbon and nitrogen metabolism of hybrid japonica rice and its relationship with spikelet and yield formation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(13):65-73. (in Chinese)
- [26] 张兆国,王一驰,李汉青,等. 液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2021, 52(6):127-135, 158. ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6):127-135, 158. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210613&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210613&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.013. (in Chinese)
- [27] 郑乐,罗锡文,曾山,等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5):63-71. ZHENG Le, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Shear characteristics of rice root-soil composite[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 63-71. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170507&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170507&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.007. (in Chinese)
- [28] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):34-37, 117. LIU Dinghui, LI Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 34-37, 117. (in Chinese)