

引用格式:

吴坚, 崔正卿, 杨生旺, 张同峰. 稻田微型螺旋推进抑草机的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(4): 89–94.

WU J, CUI Z Q, YANG S W, ZHANG T F. Design and experiment of a microspiral propulsion weed control machine for paddy field[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(4): 89–94.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 稻田微型螺旋推进抑草机的设计与试验

吴坚<sup>1,4</sup>, 崔正卿<sup>1</sup>, 杨生旺<sup>2</sup>, 张同峰<sup>3</sup>

(1.浙江科技大学机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310023; 2.西安智德汽车电子控制系统有限公司, 陕西 西安 710200; 3.浙江微松冷链科技有限公司, 浙江 杭州 310023; 4.浙江省食品物流装备技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310023)

**摘 要:** 为解决稻田机械除草作业中除草率低、伤苗率较高等问题, 提出一种光学-机械复合除草方法, 该方法通过提高水层浑浊度来抑制杂草光合作用, 从而达到除草的目的。通过改进传统的螺旋推进装置, 设计一种适用于稻田土壤环境的微型螺旋推进抑草机。建立滚筒转速对螺旋滚筒工作阻力、运行转速的关系曲线; 采用显式动力分析模块LS-DYNA对抑草机在稻田有水环境下的工作过程进行仿真分析, 建立螺旋滚筒-土壤-水的耦合模型, 进行流固耦合的仿真求解, 取得抑草机在作业过程中的切削阻力及功率等参数; 通过试验槽样机试验, 探究水层深度对水层浑浊度影响的变化规律。结果表明: 设计的微型螺旋推进抑草机最优转速为400 r/min; 仿真阻力平均值较试验值大5.47%, 仿真功率平均值较试验值大6.06%, 仿真数据与试验数据的吻合度高, 验证了仿真模型的可靠性; 当试验槽中水层深度为20、40、60 mm时, 浑浊度大于120 NTU的持续时间分别为5、8、8 h。

**关 键 词:** 稻田; 抑草机; 螺旋推进; 光学-机械复合除草; 浑浊度; SPH算法

中图分类号: S224.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)04-0089-06

## Design and experiment of a microspiral propulsion weed control machine for paddy field

WU Jian<sup>1,4</sup>, CUI Zhengqing<sup>1</sup>, YANG Shengwang<sup>2</sup>, ZHANG Tongfeng<sup>3</sup>

(1.School of Mechanical & Energy Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2.Xi'an Zhide Automobile Electronic Control System Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710200, China; 3.Zhejiang WASON Cold Chain Technology Co. Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 4.Zhejiang Key Laboratory of Food Logistics Equipment and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low weeding rate and high seedling injury rate in the mechanical weeding operation of rice fields, an optical-mechanical composite weed control method was proposed to suppress weed photosynthesis by changing the turbidity of the water layer with the aim to control weed. By improving the traditional spiral propulsion device, a microspiral propulsion weed control machine suitable for paddy field soil environment was developed. The relationship curves between the drum speed and the working resistance and running speed of the spiral drum were established. The explicit dynamic analysis module LS-DYNA was used to simulate and analyze the working process of the weed control machine in the paddy field water environment to establish the spiral drum-soil-water coupling model. The fluid-solid coupling simulation was performed to solve, and the cutting resistance and power parameters of the weed control machine were collected in the operation condition. Through the test tank prototype test,

收稿日期: 2023-05-29

修回日期: 2024-08-17

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0401304)

作者简介: 吴坚(1965—), 男, 浙江杭州人, 硕士, 教授, 主要从事物流装备和数控技术研究, [wujian@zust.edu.cn](mailto:wujian@zust.edu.cn)

the changing law of the influence of water layer thickness on water layer turbidity was explored. The results showed that the optimal speed of the designed microspiral propulsion weed suppressor machine was 400 r/min; the simulated resistance was 5.47% higher than the test value on average, and the simulated power was 6.06% larger than the test value on average. The simulation data was highly consistent with the performance test data, which verified the reliability of the simulation model. When the water layer depths in the test tank were 20, 40, and 60 mm, the duration of turbidity greater than 120 NTU were 5, 8, and 8 h, respectively.

**Keywords:** paddy field; weed control machine; spiral propulsion; optical-mechanical composite weeding; turbidity; SPH algorithm

稻田除草常用的作业方式有人工除草、化学除草和机械除草<sup>[1]</sup>。现有的机械除草装置多数只能完成行间切割除草,带有株间除草功能的装置除草率较低且有一定的伤苗率<sup>[2]</sup>。同时现有的机械除草装置多为人工操作、体型较大、功耗高。有研究<sup>[3-5]</sup>表明,当水层混浊度大于 120 NTU 时,可有效抑制水下植物的光合作用。鉴于此,笔者借鉴稻鸭共育模式<sup>[6]</sup>,提出通过机械装置搅动水稻周围土壤及附近水域改变水层浑浊度,以此来抑制杂草光合作用并实现除草的一种光学-机械复合方法,依靠水的流动性,能够同时改变稻田行间、株间水层的浑浊度,实现在稻田行间、株间除草的同时,确保不对水稻植株造成伤害。

由于螺旋推进装置的接地压力较小,可产生的推动力大,且通过性能较强,适合在一些极端松软(流体、半流体)环境下行驶<sup>[7]</sup>,故可基于螺旋推进装置,以螺旋滚筒作为行走机构,基于通过滚筒搅动土壤和水层,改变水稻水层浑浊度来抑制杂草生长的原理,笔者设计一种适用于稻田的微型螺旋推进抑草机。抑草机在改变水层浑浊度的同时也能疏松土壤,增加氧气含量,有利于肥料的吸收和利用,从而提高水稻的产量与品质<sup>[8]</sup>。本研究中,通过试验研究不同理论转速对滚筒转速、阻力的影响曲线,进行仿真试验获取抑草机在作业过程中的切削阻力和功率等参数,并通过样机试验探究不同水层深度对水浑浊度影响的变化规律,以期设计稻田微型螺旋推进抑草机及类似机械的作业参数提供依据。

## 1 稻田微型螺旋推进抑草机结构设计

### 1.1 整体结构

稻田微型螺旋推进抑草机的结构如图 1 所示,

主要由车身主体、视觉模块、控制箱、支架圆头、左右滚筒支架和 2 个旋向不同的螺旋滚筒机构组成,整机质量约为 6 kg。为适应不同水稻生长周期作业,左右螺旋滚筒中心距可通过滚筒架的花键插销结构进行调整。在除草的同时,可以在搭载平台上搭载不同的设备来完成其他辅助作业。



1 搭载平台; 2 控制箱; 3 花键插销; 4 左滚筒架; 5 支架圆头; 6 左螺旋滚筒; 7 右螺旋滚筒; 8 右滚筒架; 9 视觉模块。

图 1 微型螺旋推进抑草机的结构

Fig.1 Structure of micro-spiral propulsion weed control machine

### 1.2 工作原理

稻田微型螺旋推进抑草机的左右电机分别驱动左右螺旋滚筒转动,通过左右螺旋滚筒在不同的转动组合下实现其前进、后退、左右移动和转弯。螺旋滚筒的转动过程可视作螺旋叶片切割土壤的过程,叶片通过转动挤压土壤,获得土壤推力,从而推动抑草机移动。抑草机左右螺旋滚筒反向旋转,当滚筒转速和方向变化时,左右螺旋滚筒的轴向力和侧向力发生变化,其行驶方向也随之发生改变。

### 1.3 螺旋滚筒的设计

螺旋滚筒结构如图 2 所示,主要由螺旋滚筒和滚筒内壳组成。螺旋滚筒重要参数包括滚筒直径、滚筒长度、螺旋角、螺旋叶片高度、螺旋叶片有效长度和螺旋头数。

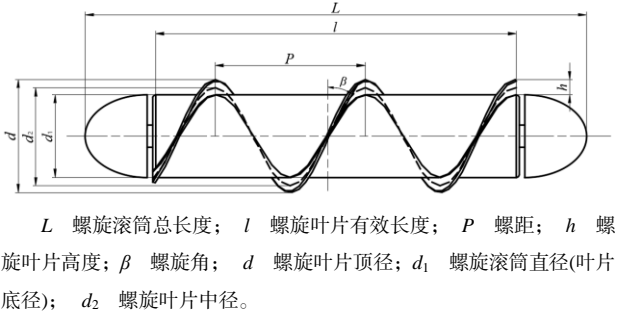


图 2 微型螺旋推进抑草机螺旋滚筒的主要结构参数

Fig.2 Main structural parameters of the spiral drum of microspiral propulsion weed control machine

该抑草机主要作业于稻田泥地，为防止螺旋叶片之间发生淤泥堵塞，选择单头螺旋。螺旋滚筒的参数设计列于表 1。

表 1 微型螺旋推进抑草机螺旋滚筒的参数设计  
Table 1 Parameter design of the spiral drum of microspiral propulsion weed control machine

参数	设计值
滚筒直径/mm	60
螺旋叶片高度/mm	10
螺旋角/(°)	30
螺距/mm	108.8
螺旋滚筒长径/mm	360

## 2 性能试验

### 2.1 性能试验条件和设计

为了测试微型螺旋抑草机在工作参数下的工作特性，搭建样机试验槽。槽内土壤厚度为 200 mm，土壤为黏土。先浸泡试验槽内土壤，根据水稻种植要求，水层不能淹过水稻心叶<sup>[9]</sup>，初始水层深度选为 20 mm。样机在试验槽中行驶，选取滚筒转速为试验变量，探究螺旋滚筒的转速和工作阻力的变化规律，以此确定最优转速。其中，电机转速、电流、电压、输出 PWM 等数据通过数据采集模块实时读取电机状态寄存器获得。通过电机转矩计算公式得到抑草机稳定工作时的驱动力与抑草机空转时的驱动力，2 个驱动力的差即为抑草机工作时受到的阻力。

分别选取 100、200、300、400、500、600 r/min 的理论滚筒转速，在水层深度为 20 mm 的土壤中进行转速试验测试。为使抑草机工作效率更高，最优转速需尽量选择更高的。基于转速试验结果，选择最高稳定转速及其临近转速进行工作阻力与滑转率试验，以求得最优转速值。

### 2.2 性能试验结果

由图 3 可知，抑草机稳定工作时的最高转速为 400 r/min。后续试验选择最高稳定转速 400 r/min 及其临近的 300、500 r/min 进行。

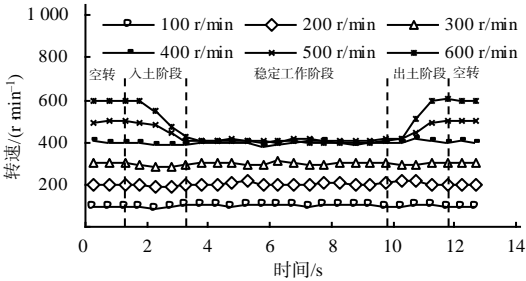


图 3 不同时间不同理论滚筒转速下的实际滚筒转速

Fig.3 Actual spiral drum rotation speed at different theoretical spiral drum rotation speeds at different times

由图4可知，当转速为300 r/min时，在稳定工作阶段，抑草机受到的阻力明显大于转速为400 r/min时的阻力；转速为500 r/min时，在稳定工作阶段，抑草机受到的阻力与转速400 r/min的阻力相近。又由表2可知，500 r/min转速时的滑转率较高，实际转速与理论转速相差较大，长时间运行会对驱动电机造成损害，说明转速为500 r/min并不适合抑草机工作。综合考虑抑草机在不同转速下的阻力及滑转率变化，认为转速为400 r/min时的工作性能优于其他转速时的，最终确定抑草机的最优转速为400 r/min。

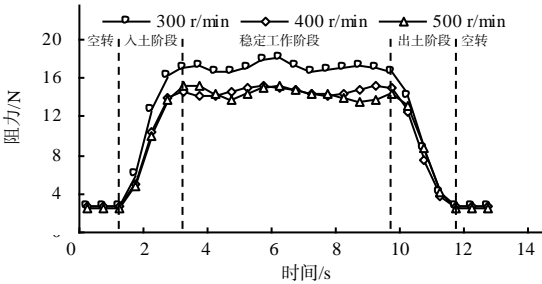


图 4 不同时间不同转速下阻力变化情况

Fig.4 Changes in resistance at different rotation speeds at different times

表 2 不同理论转速下的实际转速和滑转率

Table 2 Actual rotation speeds and slip rate under different theoretical rotation speeds

理论转速/(r min <sup>-1</sup> )	实际转速/(r min <sup>-1</sup> )	滑转率/%
300	299.37	0.21
400	394.88	1.28
500	396.21	20.76

## 3 仿真试验

### 3.1 仿真模型的建立

#### 3.1.1 螺旋滚筒有限元模型

采用 SolidWorks 建立螺旋滚筒的三维模型，由

于螺旋滚筒的刚度远高于稻田土壤的刚度,将螺旋滚筒材料定义为刚性体,以减少仿真模拟的运算时间。将螺旋滚筒模型导入 HyperWorks 中进行六面体网格划分,生成 K 文件后导入 LS-DYNA 的前后期处理软件 LS-PrePost 中。螺旋滚筒的相关参数设定如下:关键字采用 MAT\_RIGID 进行定义,螺旋滚筒密度为  $1\,280\text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量为  $3 \times 10^9\text{ Pa}$ ,泊松比为 0.3。

### 3.1.2 土壤-水有限元模型

选取黏土为研究对象,建立土壤-水有限元模型。为了模拟螺旋滚筒在稻田作业时黏土与水的相互作用,土壤层材料选用 ANSYS/LS-DYNA 中的 147 号材料(MAT\_FHWA\_SOIL),同时根据螺旋滚筒的实际作业状态,运用 LS-PrePost 建立土壤层模型和水层模型,并将水层模型建立在土壤模型的上方,从而构建模拟抑草机螺旋滚筒稻田环境中作业的土壤-水的耦合模型。

模拟仿真时,为使土壤变形应力处于弹性变形和塑性变形之间的土壤屈服应力点,必须遵守土壤的屈服准则,以防止土壤粒子发生塑性变形。在 LS-DYNA 中,MAT147 土壤材料以 Drucker-Prager 准则为主要屈服准则<sup>[10]</sup>,该准则是修正后的 Mohr-Coulomb 屈服准则。

参考文献[11],土壤模型主要参数设计列于表 3,其他参数参考文献[10]中 MAT147 的试验值选取。水层材料选择 9 号 MAT\_NULL 材料,截止压力为  $-100\text{ Pa}$ ,黏性系数为  $8.684 \times 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,并为其定义 EOS 状态方程。对土壤-水的耦合模型添加重力条件,并对土壤-水模型底面进行 BOUNDARY\_SPC\_SET 关键字 SPC 约束,通过关键字 BOUNDARY\_SPH\_NON\_REFLECTING 创建无反射边界条件。

表 3 土壤模型的参数

Table 3 Soil model parameters	
参数	设计值
土壤种类	黏土
土壤密度/( $\text{kg m}^{-3}$ )	1 578
体积模量/MPa	2.583
剪切模量/MPa	1.192
黏聚力/MPa	155
内摩擦角/( $^\circ$ )	15
含水率/%	40

### 3.1.3 流固耦合仿真分析

根据螺旋滚筒的实际作业条件以及试验得出的最优转速( $400\text{ r/min}$ )可知,滚筒前进速度  $0.725\text{ m/s}$ ,螺旋滚筒入土深度为  $40\text{ mm}$ 。为便于后续设置螺旋滚筒在不同水层深度下的运动关键字,针对螺旋滚筒建立了局部坐标系和定义了相关向量。螺旋滚筒主要进行匀速直线运动和定轴转动,用关键字 DEFINE\_CURVE 对这 2 种运动曲线进行定义,之后用关键命令 BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID 调用速度、转速曲线。

### 3.2 仿真模型验证

为了构建精确的数学模型,利用 SPH(光滑粒子流体动力)算法在土壤切削模型中的优势,结合显示动力学 LS-DYNA 的仿真技术,建立螺旋滚筒-土壤-水的耦合模型,并利用模型进行流固耦合的仿真求解。

设定相关参数,使螺旋滚筒在切削土壤和水的过程中绕着自身的中心轴以  $400\text{ r/min}$  的转速转动,其前进速度为  $0.725\text{ m/s}$ 。图 5 为螺旋滚筒初入水土耦合物的情况,图 6 为螺旋滚筒完全进入水土耦合物的情况。为模拟仿真螺旋滚筒在水土耦合物中的

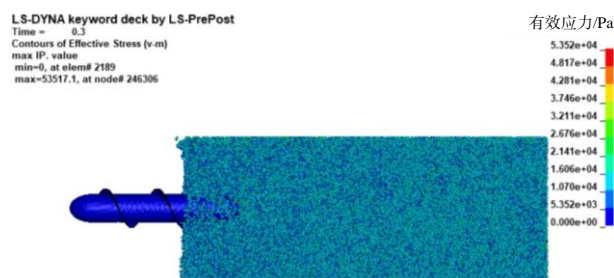


图 5 螺旋滚筒初入水土耦合物模拟

Fig.5 Simulation of water-soil coupling for the initial entry of spiral drum

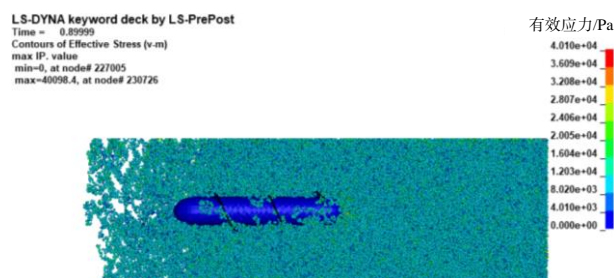


图 6 螺旋滚筒完全进入水土耦合物模拟

Fig.6 Simulation of spiral drum fully entering the water-soil coupling material

行进过程,记录螺旋滚筒运动中受到阻力的变化情况和螺旋滚筒切削土壤的功率,将仿真得到的结果与实际试验数据进行对比,验证土壤-水模型的仿真结果的准确性。

### 3.3 仿真试验结果与分析

#### 3.3.1 螺旋滚筒阻力变化

利用有限元前后期处理软件读取土壤-水模型仿真得到的阻力和功率消耗等相关数据。图 7 为仿真模拟与性能试验的螺旋滚筒切削阻力曲线。由图 7 可见,仿真模拟的切削阻力曲线整体呈上升趋势,并最终趋于稳定。这是因为随着螺旋滚筒的前进,滚筒与土壤和水的接触面积开始增大,此时土壤和水由于螺旋滚筒的挤压与剪切,等效应力也随之变大;当螺旋滚筒完全进入土壤后(0.3~0.9 s),等效应力稍有波动并趋于稳定,阻力的均值为 15.46 N。产生波动的原因可能是随着螺旋滚筒的转动前进,土壤粒子间的相互作用力发生了变化。从图 7 还可知,仿真阻力与试验阻力的变化趋势相似,但仿真阻力平均值总体较试验的高 5.47%。主要原因是性能试验时的土壤较仿真时的更加复杂,会使土壤的流动性产生一些差异,并且仿真模拟的环境是理想化的,性能试验会因为多次试验使得土壤状况发生变化,导致二者在数值上出现偏差。

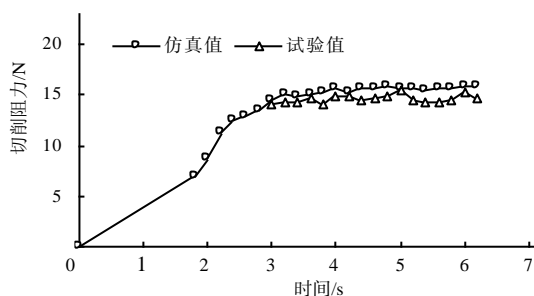


图 7 不同时间模拟仿真过程和性能试验中螺旋滚筒的切削阻力

Fig.7 Cutting resistance of spiral drum in simulation process and performance test at different times

#### 3.3.2 螺旋滚筒功率变化

从图 8 可以看出,功率仿真值和试验值的曲线都有一定的波动,但其变化趋势基本一致,且功率仿真平均值比试验平均值大 6.06%,这是由于仿真工况较为理想化且转速恒定,无法模拟实际试验除

草机的转速波动,使得仿真功率曲线较为平滑,而性能试验时无法达到仿真模拟的理想环境;因此,实际功率曲线波动较大。

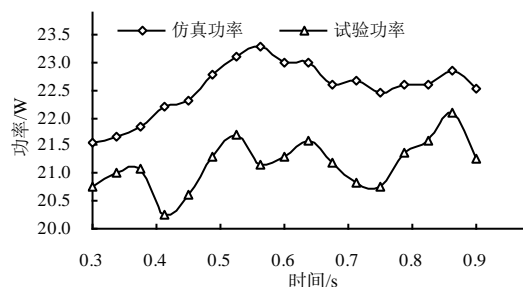


图 8 不同时间模拟仿真过程和性能试验中螺旋滚筒的功率

Fig.8 Power of spiral drum in simulation process and performance test at different times

## 4 抑草机样机试验验证

### 4.1 试验条件

样机试验槽的长、宽、高分别为 5 000、500、400 mm;土壤为黏土,厚度为 200 mm;对试验槽土壤进行浸泡,试验水层厚度分别为 20、40、60 mm。采用稻田微型螺旋推进抑草机样机进行试验。

### 4.2 试验方法与质量评价指标

试验前将试验槽的土壤处理平整,再放入清水使土壤的含水率和水层深度调整到试验要求,等待试验槽内水层稳定后开始试验。为了减少误差,在试验土槽内离一端 500 mm 处开始沿中心线设置采样点,然后每隔 1 000 mm 设置 1 个,共设置 5 个采样点。开始试验后,当抑草机完全经过 5 个采集点后用滴管采集水层表面水样装到试剂瓶中,逐一标记、封存,采用 WGZ-1000AS 浊度计测量水样浑浊度。之后每隔 40 min 采集一次水样。

### 4.3 试验结果

从图 9 可知:螺旋滚筒的转动能够带动土壤颗粒混入水中,增大水层的浑浊度,且随着水层深度的增加,水层浑浊度大于 120 NTU 的时间明显增加;当水层深度为 20 mm 时,由于水层较低,土壤颗粒和水层充分混合,浑浊度达到最大值,持续一段时间后,土壤颗粒的活动空间小、沉底快,导致水层表面浑浊度变小,水层浑浊度大于 120 NTU 的时间为 5 h;当水层深度为 40 mm 时,土壤颗粒和水混合后,土壤颗粒的活动空间较大,不易沉底,

水层表面大于 120 NTU 的浑浊度能保持 8 h 以上；当水层深度为 60 mm 时，浑浊度在最大值持续时间较短，这是因为水层过高，较大的土壤颗粒很快下沉到水层中间，但水层浑浊度大于 120 NTU 的时间仍在 8 h 以上。

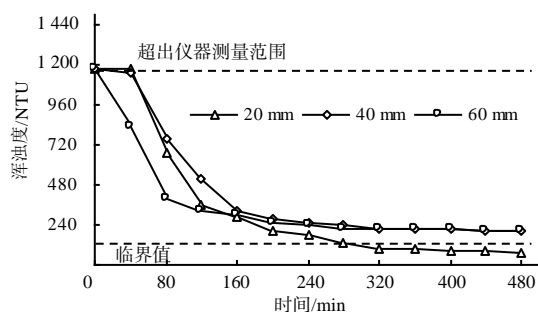


图9 不同时间和水层深度下的水层浑浊度

Fig.9 Turbidity of water layers at various times and depths

## 5 结论

1) 设计了一种微型螺旋推进抑草机,以2个旋向不同的螺旋滚筒作为行走机构,通过螺旋滚筒旋转带动稻田土壤和附近水层,提高稻田水层浑浊度,以此来减少杂草可接收到的光照,影响其光合作用,从而达到抑制杂草生长的效果。

2) 在稻田常见的黏土中,通过转速、阻力试验获得了抑草机的最优转速为 400 r/min。

3) 稻田微型螺旋推进抑草机的切削阻力、功率的仿真值与试验值较吻合,证明了仿真模型的可靠性。

4) 在试验槽样机试验中,当试验槽中水层深度为 20、40、60 mm 时,水层浑浊度大于 120 NTU 的持续时间分别为 5、8、8 h。

## 参考文献:

- [1] 周燕芝. 不同杂草防除策略下直播稻田杂草发生特征及籼稻产量形成研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- [2] 赵柳霖, 齐龙, 马旭, 等. 复合式水稻田除草机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 50–54.
- [3] WEN T, WANG G X, LI Q. Effects of water turbidity on the photosynthetic characteristics of *Myriophyllum spicatum* L.[J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2007, 6(5): 773–780.
- [4] 谷娇, 宁晓雨, 靳辉, 等. 沉积物再悬浮对浅水湖泊沉水植物光合作用及生长影响的研究进展[J]. 生态科学, 2016, 35(1): 200–208.
- [5] 王晋, 林超, 张毅敏, 等. 水体浊度对沉水植物菹草生长的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(3): 353–358.
- [6] 魏守辉, 强胜, 马波, 等. 稻鸭共作及其它控草措施对稻田杂草群落的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1067–1071.
- [7] KNIGHT S J, RUSH E S, STINSON B G. Trafficability tests with the marsh screw amphibian[J]. Journal of Terramechanics, 1965, 2(4): 31–50.
- [8] 李春胜, 谭宏杰, 李娜, 等. 水稻田间除草现状分析及未来发展趋势的思考[J]. 农业与技术, 2021, 41(24): 10–12.
- [9] 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): 29–35.
- [10] LEWIS B A. Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147[M]. Georgetown: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2004.
- [11] 潘君拯. 我国南方十三省市水田土壤参数调查[J]. 农业工程学报, 1986, 2(4): 36–43.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正