

DOI: 10.11686/cyxb2025228

http://cyxb.magtech.com.cn

范菊凤, 潘浪, 彭德军, 等. 稗草对水稻生长和产量性状的影响及其防除经济阈值研究. 草业学报, 2026, 35(4): 124—134.

FAN Ju-feng, PAN Lang, PENG De-jun, et al. Effects of barnyardgrass on rice growth and yield traits, and determination of its economic control threshold. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 124—134.

## 稗草对水稻生长和产量性状的影响 及其防除经济阈值研究

范菊凤<sup>1,2</sup>, 潘浪<sup>1</sup>, 彭德军<sup>1</sup>, 彭亚军<sup>2,4</sup>, 李巳夫<sup>2,4</sup>, 农成银<sup>1,2</sup>, 杜坚豪<sup>3</sup>, 刘祥英<sup>1</sup>,  
马国兰<sup>1,2,4\*</sup>

(1. 湖南农业大学植物保护学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南省农业科学院植物保护研究所, 湖南长沙 410125; 3. 绍兴上虞新银邦生化有限公司, 浙江上虞 312369; 4. 杂草生物学及安全防控湖南省重点实验室, 湖南长沙 410125)

**摘要:**为明确稻田稗草种群密度与水稻生长及产量损失的定量关系, 构建其防除经济阈值模型, 本研究通过盆栽与田间试验, 系统分析 0~25 株·m<sup>-2</sup> 稗草密度梯度对直播/机插水稻株型构建(株高、分蘖)及产量形成(有效穗数、实粒数、千粒重)的竞争效应。运用回归模型解析稗草密度—水稻产量损失的关系, 基于作物参数构建防除阈值模型。盆栽试验显示: 稗草密度≥7 株·桶<sup>-1</sup>时, 水稻株高抑制率达 25.15%, 分蘖衰减幅度达 80.82%, 呈现显著的密度胁迫效应; 田间试验表明: 稗草在 25 株·m<sup>-2</sup> 密度下, 直播与机插水稻株高分别降低 15.27% 和 24.07%, 有效穗数降幅为 70%~80%, 实粒数减少 45.55% 和 52.80%, 千粒重下降 3.46% 和 3.86%, 最终导致产量损失高达 86.44% 和 89.40%; 模型分析表明: 直播水稻产量损失符合二次函数模型( $y=1.0870x^2+1.1526x-4.0842, R^2=0.969$ ), 机插水稻呈线性响应( $y=11.6774x-15.1928, R^2=0.948$ ), 经校准后确定防除经济阈值分别为 2.55 和 1.63 株·m<sup>-2</sup>。稗草通过干扰水稻分蘖发生(抑制率>42%), 进而影响穗部发育(有效穗降幅>70%), 导致水稻严重减产。本研究建立的动态阈值模型为不同水稻栽培模式下稗草的精准防控提供了依据, 揭示了直播和机插水稻对不同稗草密度胁迫的差异化响应, 对构建精准杂草管理体系具有重要实践价值。

**关键词:** 稗草密度; 水稻; 直播和机插; 产量; 经济阈值

### Effects of barnyardgrass on rice growth and yield traits, and determination of its economic control threshold

FAN Ju-feng<sup>1,2</sup>, PAN Lang<sup>1</sup>, PENG De-jun<sup>1</sup>, PENG Ya-jun<sup>2,4</sup>, LI Si-fu<sup>2,4</sup>, NONG Cheng-yin<sup>1,2</sup>, DU Jian-hao<sup>3</sup>, LIU Xiang-ying<sup>1</sup>, MA Guo-lan<sup>1,2,4\*</sup>

1. College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Institute of Plant Protection, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 3. Shaoxing Shangyu Xinyinbang Biochemical Co., Ltd, Shangyu 312369, China; 4. Hunan Provincial Key Laboratory for Biology and Control of Weeds, Changsha 410125, China

**Abstract:** This research aimed to clarify the quantitative relationship between barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) density and *Oryza sativa* growth and yield loss, and establish an economic threshold model for its control. Pot and field experiments were conducted to systematically evaluate the competition effects of 0—25 plants·m<sup>-2</sup> barnyardgrass on rice growth traits (plant height, tiller number) and yield components (effective panicles number,

收稿日期: 2025-06-09; 改回日期: 2025-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1401100)和湖南省教育厅科学研究项目(22A0158)资助。

作者简介: 范菊凤(1987—), 女, 湖南郴州人, 在读硕士。E-mail: fanxuan789@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mglcqz@163.com

filled grains number, 1000-grain weight) in both direct-seeded and machine-transplanted rice systems. Regression models were used to analyze the barnyardgrass density-rice yield loss relationship, and a control threshold model was constructed based on crop parameters. Pot trials showed that at  $\geq 7$  plants $\cdot$ barrel $^{-1}$ , rice plant height and tiller number were suppressed by 25.15% and 80.82%, respectively, exhibiting significant density-dependent stress. Field data indicated that 25 plants $\cdot$ m $^{-2}$  barnyardgrass reduced rice height by 15.27% in direct-seeded rice and 24.07% in machine-transplanted rice, and reducing effective panicles number by 70%–80%, filled grains number by 45.55% and 52.80%, respectively, and 1000-grain weight by 3.46% and 3.86%, resulting in 86.44% and 89.40% yield loss in seeded and machine-transplanted rice, respectively. Regression model analysis indicated a quadratic relationship for direct-seeded rice ( $y=1.0870x^2+1.1526x-4.0842$ ,  $R^2=0.969$ ) and a linear response in machine-transplanted rice ( $y=11.6774x-15.1928$ ,  $R^2=0.948$ ). After calibration, the economic thresholds for weed control were determined to be 2.55 (direct-seeding) and 1.63 plants $\cdot$ m $^{-2}$  (machine-transplanting). Barnyardgrass reduces rice yield primarily by inhibiting tillering (>42% reduction rate) and subsequently affecting panicle development (>70% reduction in effective panicle number). The dynamic threshold models established in this study provide a basis for the precise control of barnyardgrass under different rice cultivation modes. These results reveal differential responses of direct-seeded and machine-transplanted rice to varying barnyardgrass density stresses. This information holds significant practical value for constructing precision weed management systems.

**Key words:** barnyardgrass density; rice; direct-seeded and mechane-transplanted; yield; economic threshold

随着农村劳动力结构转型,水稻(*Oryza sativa*)种植成本增加,而水稻轻简栽培作为集品种改良、农艺创新与农机配套的现代化生产技术,其省工节本、提质增效的优势显著<sup>[1]</sup>。目前,该技术已覆盖我国主要稻区超40%的种植面积<sup>[2]</sup>,成为保证粮食生产效率、稳定性和安全的重要措施。轻简化栽培技术以直播栽培和机械化插秧为核心。直播栽培前期由于干湿交替,使杂草和水稻萌发同步率提升42%,形成“草压苗”的竞争格局<sup>[2-4]</sup>;而机插稻田因秧龄缩短(<20 d)导致缓苗期延长,为杂草创造了长达10~15 d的生态位空窗期<sup>[3]</sup>。因此,轻简化栽培稻田的“草荒”问题正制约其可持续发展,其中恶性杂草——稗草(*Echinochloa crus-galli*)因其强适应性、高繁殖力和竞争优势,已成为限制水稻轻简栽培技术进一步推广和发展的主要因素。据报道,当稗草密度为10株 $\cdot$ m $^{-2}$ 时,仅通过光竞争可使水稻光合速率降低17%~39%,造成7%~36%的产量损失<sup>[5-6]</sup>。现有研究多聚焦于单一栽培模式下稗草的竞争效应,但在不同轻简栽培方式中稗草密度是如何影响水稻生长与产量的构成要素,经济危害允许水平(economic injury level, EIL)的模型构建等核心问题尚未系统解析,导致经济阈值(economic threshold, ET)的制定缺乏时空特异性<sup>[7]</sup>。本研究通过构建“盆栽模拟—田间验证—模型耦合”三维研究体系,解析稗草密度梯度(0~25株 $\cdot$ m $^{-2}$ )对直播/机插水稻生长及产量性状的影响规律;并采用Logistic回归与Monte Carlo算法建立EIL预测模型,提出不同栽培模式的ET动态阈值,为轻简栽培稻田的精准草害防控提供理论依据与决策支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

水稻品种为“株两优4026”,由湖南神农大丰种业科技有限责任公司选育。该品种属两系中熟杂交早稻,全生育期长106.5 d。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 盆栽试验方法** 试验于2024年6—11月在湖南省农业科学院植保所(113°04'53" E, 28°12'01" N)进行。试验用土采自基地耕作层(0~20 cm)的红壤土,经自然风干后按5:1(土:有机质的体积比)混入育苗有机质,均匀搅拌后装入25.5 cm $\times$ 27.0 cm(直径 $\times$ 高)的塑料桶内。加水并保持3~5 cm深水层。6月20日播种水稻和稗草(有芽有根),7月2日移栽入桶内(移栽时水稻3叶,稗草2叶1心期),水稻每桶1穴,双本栽插,稗草密度分别

设为0、1、2、3、4、5、6、7株·桶<sup>-1</sup>,共8个处理,每个处理重复3次。分别于水稻苗期(直播后20 d,机插后15 d),分蘖期(直播后40 d,机插后35 d),抽穗期(直播后60 d,机插后55 d)和灌浆期(直播后80 d,机插后75 d)调查其分蘖和株高。

**1.2.2 田间试验方法** 试验于2024年6—11月在湖南省农业科学院杂交水稻研究中心水稻试验田(113°4′53″ E,28°12′1″ N)进行。试验田地势平坦,肥力均衡,排灌方便。土壤为黏性土,pH 6.2,有机质含量为28.37 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为1.67 g·kg<sup>-1</sup>,速效氮含量为131.00 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷和有效钾含量分别为0.85和17.40 g·kg<sup>-1</sup>。

直播水稻于2024年6月17日播种(播种量26.25 kg·hm<sup>-2</sup>),机插水稻于7月5日插秧(秧龄3叶1心,行株距14.3 cm×14.3 cm,双本栽插),直播水稻中待稗草2叶期进行间苗,机插水稻于机插后移栽稗草(2叶1心期),直播和机插水稻中稗草密度均设置成0、1、3、5、7、10、15、20和25株·m<sup>-2</sup>共9个处理,每个处理重复4次,小区面积4 m<sup>2</sup>(2 m×2 m),试验均采用随机区组设计,人工清除其他杂草,试验田统一水肥与病虫害管理。分蘖和株高的调查同1.2.1。于水稻收获期测产,各试验小区去除边行后取1 m<sup>2</sup>,调查单位面积内的有效穗数,自然晾干后考种,测定每穗实粒数、千粒重和产量并计算产量损失率。

$$\text{产量损失率}(\%) = \frac{\text{无草区产量} - \text{杂草处理区产量}}{\text{无草区产量}} \times 100$$

### 1.3 数据处理及统计分析

试验数据采用DPS和SPSS软件进行统计分析,并使用Graphpad prism 8.0.2软件绘图。不同稗草密度影响下的水稻有效穗数、每穗实粒数、千粒重等数据,采用直线( $y=ax+b$ )、对数( $y=a\ln x+b$ )、二次曲线( $y=ax^2+bx+c$ )、幂函数( $y=bx^a$ )和指数( $y=be^{ax}$ )模型进行回归分析,依据显著水平和拟合误差水平确定最优拟合模型。水稻经济危害允许水平(EIL)的计算参考朱文达<sup>[8]</sup>的方法,根据水稻预期产量(yield, Y)、稻谷市场价格(price, P)、防除效果(control effectiveness, E)及杂草防除费用(control cost, CC),利用公式  $EIL(\%) = [CC/(Y \times P \times E)] \times 100\%$  进行计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 盆栽测定

#### 2.1.1 不同稗草密度对水稻株高和分蘖的影响

随着稗草密度的增加,水稻的株高和分蘖数均显著下降(表1)。当稗草密度从0增加至7株·桶<sup>-1</sup>,水稻株高从99.40 cm减少至74.40 cm,抑制率为25.15%;水稻分蘖数从24.33减少到4.67个·株<sup>-1</sup>,减少率高达80.82%。

#### 2.1.2 不同稗草密度对水稻产量性状的影响

随着稗草密度从0增至7株·桶<sup>-1</sup>时,水稻有效穗数从22.00降至3.33个·桶<sup>-1</sup>,降低率为84.85%(表2)。每穗实粒数从117.33锐减至39.00粒·穗<sup>-1</sup>,损失率为66.76%。千粒重仅从22.37下降至21.67 g,降低率为3.13%。最终导致产量自43.43降低至11.40 g·桶<sup>-1</sup>(总损失率为73.75%)。

从水稻穗形和数量可直接看出稗草密度对水稻产量的影响(图1),无稗草(0株·桶<sup>-1</sup>)时,水稻穗大且数量多,产量最高;随稗草密度增加(1~7株·桶<sup>-1</sup>),水稻穗逐渐变小、数量减少,产量呈明显

表1 不同稗草密度对盆栽水稻生理性状的影响

Table 1 Effects of different densities of barnyardgrass on the growth characters of paddy rice

BD (plant·barrel <sup>-1</sup> )	PH (cm)	PHIR (%)	分蘖数 Tillers (No.·plant <sup>-1</sup> )	TRR (%)
0	99.40±4.60aA	0.00	24.33±4.51aA	0.00
1	93.97±3.93abAB	5.47	15.00±3.00bB	38.36
2	93.40±1.73abAB	6.04	12.33±1.15bB	49.32
3	89.30±3.56bcABC	10.16	12.00±1.00bB	50.68
4	88.17±6.43bcABC	11.30	11.67±1.53bB	52.05
5	83.37±3.37cdBCD	16.13	6.33±1.53cC	73.97
6	78.67±2.15deCD	20.86	5.00±1.00cC	79.45
7	74.40±7.92eD	25.15	4.67±1.53cC	80.82

BD: 稗草密度 Barnyardgrass density; PH: 株高 Plant height; PHIR: 株高抑制率 Plant height inhibition rate; TRR: 分蘖减少率 Tillers reduction rate; 同列数据不同大、小写字母分别表示在0.01和0.05水平差异显著,下同 The different capital and small letters mean significant differences at the 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same below.

表 2 不同稗草密度对盆栽水稻产量性状的影响(水稻黄熟期)

Table 2 Effects of different *E. crus-galli* densities on yield traits of potted rice (yellow ripening stage of rice)

BD (plant· barrel <sup>-1</sup> )	EP (No.·barrel <sup>-1</sup> )	EPL (%)	FGPP	FGL (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	TGWL (%)	产量 Yield (g·barrel <sup>-1</sup> )	YL (%)
0	22.00±2.60aA	0.00	117.33±10.26aA	0.00	22.37±0.12aA	0.00	43.43±1.80aA	0.00
1	10.67±2.50bB	51.52	113.00±2.65abA	3.69	22.20±0.26abAB	0.75	28.07±2.08bB	35.38
2	9.00±0.00bcB	59.09	102.33±9.29bcAB	12.78	22.10±0.10abcAB	1.19	26.77±2.19bB	38.37
3	8.33±3.00bcBC	62.12	91.67±2.31cB	21.88	21.97±0.31abcAB	1.79	21.90±2.19cC	49.58
4	6.33±1.50cdBCD	71.21	88.67±10.26cB	24.43	21.93±0.21abcAB	1.94	20.07±1.53cdC	53.80
5	6.00±1.00cdBCD	72.73	55.00±9.85dC	53.13	21.83±0.29bcAB	2.38	17.50±1.65dCD	59.71
6	4.00±0.00dCD	81.82	49.00±6.56dC	58.24	21.73±0.31bcAB	2.83	13.77±1.71eDE	68.30
7	3.33±0.50dD	84.85	39.00±6.56eC	66.76	21.67±0.31cB	3.13	11.40±0.69eE	73.75

EP: 有效穗数 Effective panicles; EPL: 有效穗降低率 Effective panicles loss; FGPP: 每穗实粒数 Filled grains per panicle; FGL: 实粒损失率 Filled grains loss; TGWL: 千粒重降低率 1000-grain weight loss; YL: 产量损失率 Yield loss. 下同 The same below.

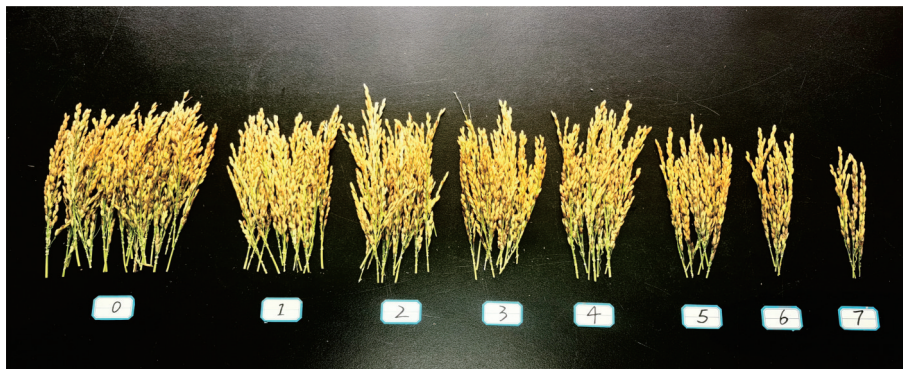


图 1 不同稗草密度对水稻产量的影响

Fig. 1 Effects of different *E. crus-galli* densities on rice yield

0、1、2、3、4、5、6 和 7 表示每桶稗草种植的株数。0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 represent the number of barnyard grass (*E. crus-galli*) plants per barrel.

下降趋势。这表明稗草与水稻存在资源竞争(如养分、光照、水分),密度越高,竞争越激烈,水稻生长受抑制越明显,最终导致产量降低。

## 2.2 田间试验结果

**2.2.1 不同稗草密度对水稻株高和分蘖的影响** 水稻黄熟期调查结果显示(表 3),在稗草密度自 0 增至 25 株·m<sup>-2</sup>时,直播水稻的株高从 114.50 降低至 97.02 cm(抑制率为 15.27%),分蘖数由每株 11.83 下降为 6.17(减少率为 47.89%);机插水稻株高从 115.83 下降至 87.95 cm(抑制率为 24.07%),分蘖数由每株 22.58 缩减至 13.00(减少率为 42.44%)。

**2.2.2 不同稗草密度对不同生育期水稻分蘖的影响** 直播和机插水稻分蘖均随稗草密度的增加而逐渐下降。苗期(播后 20 d),直播水稻的分蘖略受稗草影响,但不同密度处理之间无明显规律。在分蘖期(播后 40 d)、抽穗期(播后 60 d)和灌浆期(播后 80 d)水稻的分蘖数均随着稗草密度的增加而显著下降。而机插水稻在上述各生育期内分蘖数也均随着稗草密度的增加而逐步下降(图 2 和图 3)。

**2.2.3 不同稗草密度对不同生育期水稻株高的影响** 田间试验结果表明(图 4 和图 5),稗草密度对直播和机插水稻的株高均有显著的抑制效应。随稗草密度由 0 增至 25 株·m<sup>-2</sup>,水稻株高明显下降,其中机插水稻受抑制程度更为显著。当稗草密度为 1 株·m<sup>-2</sup>时,两种栽培方式水稻株高与无草对照均无显著差异;密度≥3 株·m<sup>-2</sup>时,株高开始显著低于对照,且抑制效应随密度上升持续增强。

表3 不同稗草密度对水稻株高和分蘖的影响(水稻黄熟期)

Table 3 Effects of different *E. crus-galli* densities on the plant height and tillering in rice (yellow ripening stage of rice)

BD (plant·m <sup>-2</sup> )	直播稻 Direct seeding rice				机插稻 Machine transplanted rice			
	PH (cm)	PHIR (%)	分蘖数 Tillers (No. ·plant <sup>-1</sup> )	TRR (%)	PH (cm)	PHIR (%)	分蘖数 Tillers (No. ·plant <sup>-1</sup> )	TRR (%)
0	114.50±0.79aA	0.00	11.83±0.88aA	0.00	115.83±3.37aA	0.00	22.58±0.88aA	0.00
1	114.29±0.89aAB	0.18	11.42±0.83aA	3.52	115.27±0.59abA	0.49	21.58±2.30aA	4.43
3	110.96±0.39bB	3.09	9.50±0.43bB	19.72	113.31±0.34bA	2.18	18.50±1.82bB	18.08
5	105.28±0.65cC	8.06	8.50±0.58cBC	28.17	109.78±2.07cB	5.23	18.00±1.96bBC	20.30
7	104.08±0.83cdC	9.10	8.25±0.42cdBC	30.28	102.95±1.62dC	11.12	16.00±0.98cBCD	29.15
10	101.85±0.57dC	11.05	7.50±0.58deCD	36.62	102.73±0.40dC	11.32	15.83±0.43cBCDE	29.89
15	97.93±1.22eD	14.48	7.42±0.17deCDE	37.32	96.13±1.43eD	17.01	15.17±1.17cdCDE	32.84
20	97.58±4.41eD	14.78	6.83±0.79efDE	42.25	89.22±1.17fE	22.98	13.50±0.79deDE	40.22
25	97.02±1.56eD	15.27	6.17±0.43fE	47.89	87.95±1.31fE	24.07	13.00±0.47eE	42.44

通过回归分析拟合不同稗草密度对直播和机插水稻株高及分蘖的影响,筛选出最优拟合模型进行 $R$ 值和 $P$ 值复核。二次曲线模型对直播和机插水稻株高的拟合效果均较好,其方程分别为 $y=0.1427x^2-3.9198x+119.9101$ , $y=-0.2269x^2-1.5827x+118.7819$ 。直播水稻的分蘖同样符合二次曲线模型,方程为 $y=0.0643x^2-1.3361x+13.2460$ ;机插水稻的分蘖则更符合指数模型,方程为 $y=23.7140e^{-0.0688x}$ (表4)。

**2.2.4 不同稗草密度对水稻产量性状的影响** 直播和机插水稻的有效穗数和每穗实粒数均随着稗草密度的增加而逐渐下降,稗草对直播水稻的影响大于机插。稗草密度从0增至25株·m<sup>-2</sup>时,直播水稻有效穗数从293.33减至58.67个·m<sup>-2</sup>,降低率为80%。每穗实粒数从123.67降至67.33,损失率为45.55%;而机插水稻有效穗数从280减少至84个·m<sup>-2</sup>,降低率为70%。每穗实粒数从142.67降至67.33,损失率达52.80%(表5)。对直播水稻有效穗数及每穗实粒数拟合和回归分析,并通过 $R^2$ 值和 $P$ 值复核发现,二次曲线模型对两者的拟合度都较高,方程分别为 $y=-4.4769x^2+12.5802x+287.4603$ , $y=-0.8279x^2+2.5292x+119.9048$ 。这表明直播水稻每穗实粒数随稗草密度的增加呈现先升后降的非线性趋势。对机插水稻的拟合中,指数模型对有效穗数拟合度最高,方程为 $y=382.6598e^{-0.1599x}$ 。而二次曲线模型对每穗实粒数的拟合度较高,方程为 $y=-0.6858x^2-1.5032x+143.9365$ 。这说明机插水稻的每穗实粒数与稗草密度之间存在明显的二次函数关系(表6)。

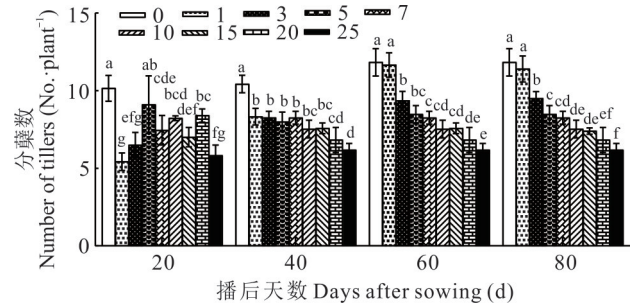


图2 田间试验条件下不同稗草密度对直播水稻分蘖的影响  
Fig. 2 Effects of different *E. crus-galli* densities on the tillering ability of direct-seeded rice under field conditions

0、1、3、5、7、10、15、20和25表示每m<sup>2</sup>稗草种植的株数。不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, and 25 represent the number of barnyard grass (*E. crus-galli*) plants per square meter. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

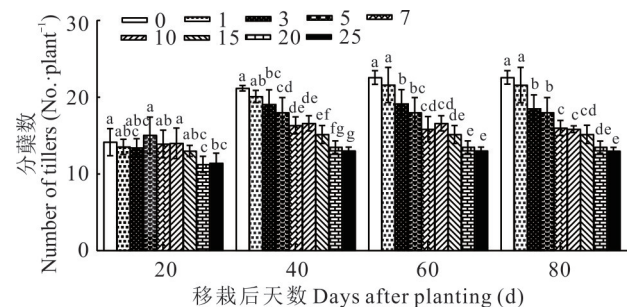


图3 田间试验条件下不同稗草密度对机插水稻分蘖的影响  
Fig. 3 Effects of different *E. crus-galli* densities on the tillering ability of machine-transplanted rice under field conditions

0、1、3、5、7、10、15、20和25表示每m<sup>2</sup>稗草种植的株数。不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, and 25 represent the number of barnyard grass (*E. crus-galli*) plants per square meter. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

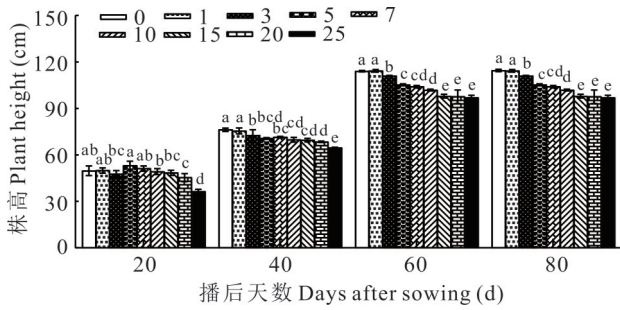


图 4 田间试验条件下不同稗草密度对直播水稻株高的影响  
Fig. 4 Effects of different *E. crus-galli* densities on the plant height of direct-seeded rice under field conditions

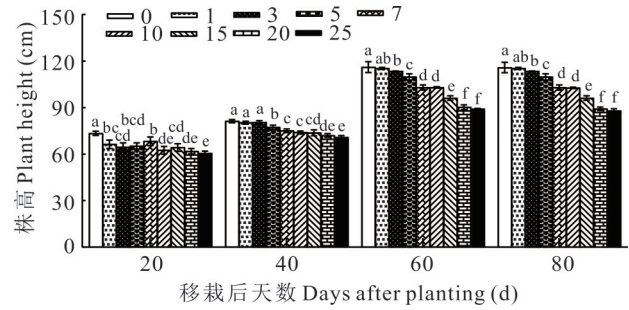


图 5 田间试验条件下不同稗草密度对机插水稻株高的影响  
Fig. 5 Effects of different *E. crus-galli* densities on the plant height of machine-transplanted rice under field conditions

表 4 不同密度的稻田稗草与水稻株高和分蘖的回归分析

Table 4 Regression analysis between the different densities paddy fields of *E. crus-galli* and plant height, tillers of paddy rice

项目 Item	水稻类型 Rice type	拟合方式 Fit method	回归模型 Regression model	$R^2$	$F$	$P$	
株高 Plant height	直播稻 Direct seeding rice	直线 Linear	$y = -2.4929x + 117.2942$	0.9065	329.6071	0.000000	
		对数 Logarithmic	$y = -9.2619 \ln x + 118.0041$	0.8631	214.3747	0.000000	
		二次曲线 Conic	$y = 0.1427x^2 - 3.9198x + 119.9101$	0.9217	194.3272	0.000000	
		幂函数 Power	$y = 118.4905x^{-0.0876}$	0.8528	197.0274	0.000000	
		指数 Exponent	$y = 117.7808e^{-0.0237x}$	0.9064	329.4231	0.000000	
机插稻 Machine transplanted rice	Machine transplanted rice	直线 Linear	$y = -3.8517x + 122.9417$	0.9419	551.5196	0.000000	
		对数 Logarithmic	$y = -13.3398 \ln x + 122.6582$	0.7794	120.0925	0.000000	
		二次曲线 Conic	$y = -0.2269x^2 - 1.5827x + 118.7819$	0.9587	383.1219	0.000000	
		幂函数 Power	$y = 124.0318x^{-0.1295}$	0.7585	106.7958	0.000000	
		指数 Exponent	$y = 124.5920e^{-0.0377x}$	0.9340	481.4081	0.000000	
分蘖 Tillers	直播稻 Direct seeding rice	直线 Linear	$y = -0.6931x + 12.0671$	0.8605	209.8028	0.000000	
		对数 Logarithmic	$y = -2.6768 \ln x + 12.4094$	0.8855	262.8637	0.000000	
		二次曲线 Conic	$y = 0.0643x^2 - 1.3361x + 13.2460$	0.8986	146.1762	0.000000	
		幂函数 Power	$y = 12.8501x^{-0.2992}$	0.8641	216.2676	0.000000	
		指数 Exponent	$y = 12.4998e^{-0.0796x}$	0.8865	265.4327	0.000000	
	机插稻 Machine transplanted rice	Machine transplanted rice	直线 Linear	$y = -1.1903x + 23.0810$	0.8360	173.3010	0.000000
			对数 Logarithmic	$y = -4.5383 \ln x + 23.5850$	0.8383	176.2773	0.000000
			二次曲线 Conic	$y = 0.0838x^2 - 2.0281x + 24.6171$	0.8573	99.0930	0.000000
			幂函数 Power	$y = 24.2179x^{-0.2565}$	0.8276	163.2003	0.000000
			指数 Exponent	$y = 23.7140e^{-0.0688x}$	0.8623	212.9478	0.000000

直播和机插水稻的千粒重随着稗草密度的增加而逐渐下降。稗草密度从 0 增至 25 株·m<sup>-2</sup>时,直播水稻千粒重从 23.13 降至 22.33 g,降低率为 3.46%。而机插水稻千粒重从 23.30 降至 22.40 g,降低率为 3.86%(表 5)。对稗草密度与水稻千粒重进行曲线拟合和回归分析发现,直线对直播水稻的拟合度较高,方程为  $y = -0.0967x + 23.1796$ ,说明随着稗草密度  $x$  的增加,千粒重  $y$  呈线性下降趋势,但下降幅度相对较小。对数则对机插水稻的拟合度较高,方程为  $y = -0.4115 \ln x + 23.3186$ ,表明机插稻的千粒重与稗草密度存在对数关系(表 6)。

**2.2.5 不同稗草密度对水稻产量损失的影响** 随着稗草密度增加,直播和机插水稻的产量逐渐下降。当稗草密度从 0 增长至 25 株·m<sup>-2</sup>时,直播水稻的产量从 8395.34 降至 890.09 kg·hm<sup>-2</sup>,损失率为 89.40%。机插水稻产量从 9293.75 降低至 1259.84 kg·hm<sup>-2</sup>,损失率达 86.44%(表 5)。直播水稻产量和损失率都符合二次曲线模型,

表5 不同密度的稻田稗草对水稻产量性状的影响

Table 5 Effect of different densities paddy fields of *E. crus-galli* on the yield characters of paddy rice

水稻类型 Rice type	BD (plant. · m <sup>-2</sup> )	EP (No. · m <sup>-2</sup> )	EPL (%)	FGPP	FGL (%)	千粒重 TGW (g)	TGWL (%)	产量 Yield (kg · hm <sup>-2</sup> )	YL (%)
直播稻 Direct seeding rice	0	293.33±9.24aA	0.00	123.67±1.53aA	0.00	23.13±0.32aA	0.00	8395.34±281.60aA	0.00
	1	290.00±19.29aA	1.14	122.33±0.58aA	1.08	22.97±0.23abAB	0.72	8155.98±636.16abA	2.85
	3	286.00±24.58aA	2.50	119.33±5.13abAB	3.50	22.90±0.20abAB	1.01	7798.65±301.41bA	7.11
	5	276.00±8.00abAB	5.91	112.00±1.00bcABC	9.43	22.73±0.15abcAB	1.73	7029.43±133.81cB	16.27
	7	254.67±8.33bB	13.18	108.67±2.52cdBC	12.13	22.70±0.10abcAB	1.87	6282.25±101.52dB	25.17
	10	180.00±10.58cC	38.64	105.33±2.52cdCD	14.82	22.57±0.15bcAB	2.45	4280.30±258.10cC	49.02
	15	170.67±12.86cC	41.82	102.33±1.53deCD	17.25	22.53±0.25bcAB	2.59	3934.50±245.33cC	53.13
	20	68.00±12.00dD	76.82	96.00±7.55eD	22.37	22.40±0.20cB	3.17	1475.47±370.51dD	82.43
	25	58.67±6.11dD	80.00	67.33±9.71fE	45.55	22.33±0.49cB	3.46	890.09±220.24gD	89.40
机插稻 Machine transplanted rice	0	280.00±2.00aA	0.00	142.67±2.08aA	0.00	23.30±0.30aA	0.00	9293.75±60.41aA	0.00
	1	271.00±2.65abA	3.21	139.67±4.93aAB	2.10	23.07±0.15abAB	1.00	8752.01±333.58bAB	5.83
	3	266.67±2.31bAB	4.76	133.00±7.55abAB	6.78	22.83±0.38bcAB	2.00	8097.73±351.17cB	12.87
	5	252.00±6.93cB	10.00	124.67±6.66bcBC	12.62	22.77±0.31bcAB	2.29	7155.82±433.24dC	23.00
	7	162.67±12.22dC	41.90	113.67±9.07cdCD	20.33	22.63±0.32bcB	2.86	4177.39±295.15eD	55.05
	10	138.67±9.02eD	50.48	109.33±2.52dCD	23.36	22.63±0.31bcB	2.86	3429.57±147.20fE	63.10
	15	118.67±8.08fE	57.62	106.00±3.61deDE	25.70	22.57±0.15cB	3.15	2845.67±306.41gEF	69.38
	20	116.00±6.93fE	58.57	96.00±7.55eE	32.71	22.40±0.10cB	3.86	2502.94±335.46gF	73.07
	25	84.00±6.93gF	70.00	67.33±9.71fF	52.80	22.40±0.10cB	3.86	1259.84±118.08hG	86.44

方程为  $y = -91.3022x^2 - 95.9771x + 8731.3473$  和  $y = 1.0870x^2 + 1.1526x - 4.0842$ , 表明产量和损失率与稗草密度呈复杂的非线性关系。机插水稻的产量和损失率都呈显著的直线关系, 方程分别为  $y = -1085.2206x + 10705.5159$  和  $y = 11.6774x - 15.1928$ , 说明机插水稻的产量和损失率都随稗草密度的增加而呈线性下降(表7)。

### 2.3 稻田稗草经济危害允许水平及其防除经济阈值的确定

株两优4026的直播与机插产量分别为8395和9294 kg·hm<sup>-1</sup>(稻谷收购价为2.48元·kg<sup>-1</sup>)。针对稻田稗草, 直播田与机插田均采用化学防除方式(施药2次), 主要药剂为300 g·L<sup>-1</sup>丙草胺乳油和20%噁唑酰草胺·氰氟草酯可分散油悬浮剂。除草成本分别为1175元·hm<sup>-2</sup>(药剂875元·hm<sup>-2</sup>, 人工300元·hm<sup>-2</sup>)和855元·hm<sup>-2</sup>(药剂555元·hm<sup>-2</sup>, 人工300元·hm<sup>-2</sup>), 防除效果约95%。基于水稻栽培方式和除草措施的差异, 稗草的经济危害允许水平(EIL)在直播化除和机插化除下分别为5.94%和3.91%。结合稗草密度(y)与水稻产量损失率(x)的回归模型(直播:  $y = 1.0870x^2 + 1.1526x - 4.0842$ ; 机插:  $y = 11.6774x - 15.1928$ ), 将EIL(作为x)代入模型计算, 得出直播化除与机插化除的经济阈值(ET)分别为稗草密度2.55和1.63株·m<sup>-2</sup>(表8)。

## 3 讨论

### 3.1 不同稗草密度对水稻生长和产量性状的影响

杂草竞争是限制水稻生产力的重要因素, 其中稗草是稻田最具威胁性的杂草之一。明确稗草密度对水稻生长及产量性状的影响, 对制定有效的防除策略至关重要。本研究表明, 稗草密度增加显著抑制水稻生长并导致严重减产。盆栽试验中, 当稗草密度达到7株·桶<sup>-1</sup>时, 水稻株高抑制率达25.15%, 分蘖数及有效穗数降低率均超过80%, 每穗实粒数减少66.76%, 最终产量损失高达73.75%。田间试验(直播水稻)结果进一步证实了这一趋势: 稗草密度升至25株·m<sup>-2</sup>时, 水稻株高抑制率为15.27%, 分蘖数和每穗实粒数减少率均超过47%, 有效穗数与产量损失率均在80%以上。上述水稻株高、分蘖数、有效穗数及每穗实粒数等关键指标随稗草密度的增加而显著下降的结论, 与Song等<sup>[9]</sup>, Seong等<sup>[10]</sup>, Pane等<sup>[11]</sup>和张自常等<sup>[12]</sup>关于水稻株高、分蘖数、有效穗数及每穗实粒

表 6 不同密度稻田稗草与水稻有效穗数、每穗实粒数和千粒重的回归分析

Table 6 Regression of *E. crus-galli* density on effective panicles, filled grains per panicle, and 1000-grain weight in rice

项目 Item	水稻类型 Rice type	拟合方式 Fit method	回归模型 Regression model	$R^2$	$F$	$P$
有效穗数 Effective panicles	直播稻 Direct seeding rice	直线 Linear	$y = -32.1889x + 369.5370$	0.8626	156.9669	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = -105.7671 \ln x + 359.0384$	0.6424	44.9141	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = -4.4769x^2 + 12.5802x + 287.4603$	0.9483	219.9687	0.000000
		幂函数 Power	$y = 455.0518x^{-0.6495}$	0.5355	28.8182	0.000014
		指数 Exponent	$y = 503.0577e^{-0.2048x}$	0.7721	84.6898	0.000000
	机插稻 Machine transplanted rice	直线 Linear	$y = -27.6389x + 325.9352$	0.9199	287.2384	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = -98.1748 \ln x + 327.3870$	0.8006	100.3905	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = -0.0826x^2 - 26.8128x + 324.4206$	0.9200	137.9534	0.000000
		幂函数 Power	$y = 376.9922x^{-0.5516}$	0.7580	78.3206	0.000000
		指数 Exponent	$y = 382.6598e^{-0.1599x}$	0.9235	301.9913	0.000000
每穗实粒数 Filled grains per panicle	直播稻 Direct seeding rice	直线 Linear	$y = -5.7500x + 135.0833$	0.7814	89.3715	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = -19.2745 \ln x + 133.7499$	0.6057	38.3960	0.000002
		二次曲线 Conic	$y = -0.8279x^2 + 2.5292x + 119.9048$	0.8646	76.6105	0.000000
		幂函数 Power	$y = 138.0347x^{-0.1941}$	0.5132	26.3574	0.000026
		指数 Exponent	$y = 140.8975e^{-0.0593x}$	0.6950	56.9707	0.000000
	机插稻 Machine transplanted rice	直线 Linear	$y = -8.3611x + 156.5093$	0.8750	174.9495	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = -28.9921 \ln x + 155.9428$	0.7257	66.1292	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = -0.6858x^2 - 1.5032x + 143.9365$	0.9052	114.5620	0.000000
		幂函数 Power	$y = 163.5621x^{-0.2662}$	0.6249	41.6496	0.000000
		指数 Exponent	$y = 166.2976e^{-0.0790x}$	0.7988	99.2765	0.000000
千粒重 1000-grain weight	直播稻 Direct seeding rice	直线 Linear	$y = -0.0967x + 23.1796$	0.5781	34.2530	0.000004
		对数 Logarithmic	$y = -0.3611 \ln x + 23.2099$	0.5564	31.3624	0.000008
		二次曲线 Conic	$y = 0.0033x^2 - 0.1299x + 23.2405$	0.5816	16.6792	0.000029
		幂函数 Power	$y = 23.2126x^{-0.0159}$	0.5543	31.0888	0.000008
		指数 Exponent	$y = 23.1828e^{-0.0043x}$	0.5786	34.3271	0.000004
	机插稻 Machine transplanted rice	直线 Linear	$y = -0.1044x + 23.2556$	0.5914	36.1894	0.000003
		对数 Logarithmic	$y = -0.4115 \ln x + 23.3186$	0.6331	43.1415	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = 0.0110x^2 - 0.2148x + 23.4579$	0.6253	20.0297	0.000008
		幂函数 Power	$y = 23.3202x^{-0.0180}$	0.6315	42.8340	0.000000
		指数 Exponent	$y = 23.2567e^{-0.0046x}$	0.5916	36.2200	0.000003

数等指标均受稗草影响而显著下降的研究结果相符。本研究观察到稗草密度为  $25 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ , 可造成产量损失率超 80% 的严重减产现象, 这也与朱文达<sup>[8]</sup>关于稗草密度为  $13.33 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ , 即可造成产量损失超 50%, 以及张自常等<sup>[12]</sup>报道的水稻分蘖数、有效穗数随稗草密度增加呈指数型下降的规律一致。此外, 本研究结果支持了杂草生物量与产量损失存在非线性关系的观点<sup>[13]</sup>。

### 3.2 稗草影响直播和机插水稻的产量性状、分蘖动态及其经济阈值

明确稗草竞争对不同栽培模式水稻(直播 vs 机插)生长及产量的差异化影响, 并确定关键防控窗口期和经济阈值, 对优化稻田杂草治理策略至关重要。本研究发现: 无杂草时, 机插水稻的每穗实粒数和产量均显著高于直

表 7 不同稗草密度与水稻产量及其损失的回归分析

Table 7 Regression analysis of *E. crus-galli* density on rice yield and yield loss

项目 Item	水稻类型 Rice type	拟合方式 Fit method	回归模型 Regression model	$R^2$	$F$	$P$
产量 Yield	直播稻 Direct seeding rice (DSR)	直线 Linear	$y = -1008.9996x + 10405.2218$	0.9327	346.4057	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = -3429.7193 \ln x + 10238.7434$	0.7433	72.4033	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = -91.3022x^2 - 95.9771x + 8731.3473$	0.9719	414.9087	0.000000
		幂函数 Power	$y = 14587.7769x^{-0.8595}$	0.5638	32.3141	0.000006
		指数 Exponent	$y = 16440.0966e^{-0.2684x}$	0.7972	98.2734	0.000000
	机插稻 Machine transplanted rice (MTR)	直线 Linear	$y = -1085.2206x + 10705.5159$	0.9476	452.4891	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = -3944.4416 \ln x + 10890.0866$	0.8636	158.2312	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = 25.1499x^2 - 1336.7193x + 11166.5968$	0.9503	229.2323	0.000000
		幂函数 Power	$y = 14380.7476x^{-0.8355}$	0.7547	76.8962	0.000000
		指数 Exponent	$y = 14804.9488e^{-0.2435x}$	0.9293	328.4764	0.000000
产量 损失率 Yield loss rate	直播稻 DSR	直线 Linear	$y = 12.0229x - 24.0132$	0.9300	332.1073	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = 40.8649 \ln x - 22.0258$	0.7411	71.5592	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = 1.0870x^2 + 1.1526x - 4.0842$	0.9690	375.3267	0.000000
	机插稻 MTR	直线 Linear	$y = 11.6774x - 15.1928$	0.9478	453.5602	0.000000
		对数 Logarithmic	$y = 42.4448 \ln x - 17.1801$	0.8637	158.4245	0.000000
		二次曲线 Conic	$y = -0.2711x^2 + 14.3881x - 20.1622$	0.9504	229.8447	0.000000

表 8 稗草的经济危害允许水平及经济阈值

Table 8 The economic infestation level and economic threshold of *E. crus-galli*

防治措施 Control measure	杂草防除费用 Control cost (CNY·hm <sup>-2</sup> )	防除效果 Control efficacy (%)	经济危害允许水平 Economic injury level (%)	经济阈值 Economic threshold (plant·m <sup>-2</sup> )
直播化除 Direct-seed herbicide	1175	95	5.94	2.55
机插化除 Mechanical transplanting herbicide	855	95	3.91	1.63

播水稻;随着稗草密度增加(1~15株·m<sup>-2</sup>),机插水稻的产量损失率大于直播水稻,可能与机插水稻群体结构更易受杂草空间侵占抑制分蘖有关,但当稗草密度增至20~25株·m<sup>-2</sup>及以上时,直播水稻的产量损失率反而更高,这与生产实际中直播水稻田稗草密度远远大于5株·m<sup>-2</sup>,杂草高达427株·m<sup>-2</sup>有关,其中稗草占82.7%,高达353株·m<sup>-2</sup>,因而高密度的稗草可导致直播水稻严重减产,甚至颗粒无收;稗草对水稻的竞争效应存在显著的生育期差异:在苗期稗草对水稻的抑制作用不显著,但进入分蘖期后株高抑制率为28.7%~43.2%、分蘖数降幅为80.82%,分蘖分析表明直播与机插水稻分别由2~6叶位一次分蘖贡献70.51%和73.81%的产量<sup>[14-16]</sup>,因此,分蘖期被确认为是水稻产量形成的关键期,而水稻苗期(分蘖启动前)应该是杂草防控的黄金窗口期,建议杂草防控采用“早期治理”的策略,首先采用土壤封闭处理进行苗前除草。其次采用“封杀结合”将土壤封闭处理(封)和苗后茎叶处理(杀)两种除草方式科学地结合起来,发挥各自的优势,弥补对方的不足,从而达到更全面、更持久、更经济的杂草防除效果。最后视田间草情在水稻3~4叶期进行苗后茎叶处理。基于产量损失模型和生产成本构建的经济阈值模型确定,直播田与机插田稗草防除经济阈值分别为2.55和1.63株·m<sup>-2</sup>。本研究关于机插水稻在无草条件下产量优势的结论,与伍丹华等<sup>[17]</sup>报道的直播水稻的产量显著低于机插水稻与其每穗实粒数相关及罗锡文等<sup>[18]</sup>和Reed等<sup>[19]</sup>报道的机插水稻由于株行距一致、返青快、分蘖更优从而导致其理论产量显著高于直播水稻的结论一致;高稗草密度下(>25株·m<sup>-2</sup>)造成的严重产量损失(>80%)与Chauhan等<sup>[20]</sup>和Wang等<sup>[21]</sup>的研究

一致;分蘖期作为关键竞争窗口期的观点,与杂草“早期治理”的防控原则形成理论呼应<sup>[22-26]</sup>;所得经济阈值与张纪利等<sup>[6]</sup>报道的范围(1.30~1.85株·m<sup>-2</sup>)相近,与朱文达<sup>[8]</sup>(0.84~0.86株·m<sup>-2</sup>)的差异则印证了阈值确立需多维参数整合的系统性特征。经济阈值需动态整合产量预期、价格、成本及农艺措施等参数,建议建立区域化的杂草精准防控体系。

### 3.3 展望

本研究聚焦于稗草密度对水稻生长及产量的生态学影响,首次量化了直播/机插水稻对稗草密度的差异化响应,揭示分蘖抑制是减产主因。确定了水稻分蘖启动前是稗草防控的关键窗口期,建立的动态经济阈值(直播 2.55株·m<sup>-2</sup>、机插 1.63株·m<sup>-2</sup>)模型为轻简栽培稻田的精准除草提供了决策依据。然而,水稻与稗草竞争的深层分子机制尚未深入探究。但近年来关于水稻分蘖功能基因的发掘及其功能的清晰解析也许为解决这一问题提供新的思路<sup>[27-29]</sup>,未来研究可进一步探索。

## 4 结论

稗草通过抑制水稻的分蘖与株高,减少有效穗数而造成水稻严重减产;在水稻苗期稗草的胁迫并不能显著抑制其株高和分蘖,但进入分蘖期后可显著降低水稻的株高和分蘖数,因此,稗草的防控须坚持“早期治理”原则;当稗草密度大于 20株·m<sup>-2</sup>后,其对直播水稻的产量损失率远大于机插水稻,两种不同水稻栽培方式下,防除经济阈值分别为机插水稻 1.63株·m<sup>-2</sup>和直播水稻 2.55株·m<sup>-2</sup>。

## 参考文献 References:

- [1] Dong L Y, Shen J L, Gao T C, *et al.* The eco-economic threshold and the critical period for controlling *Leptochloa chinensis* in direct-sowing rice fields. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2003, 26(3): 41-45.  
董立尧,沈晋良,高同春,等.水直播稻田千金子的生态经济阈值及其防除临界期.南京农业大学学报,2003,26(3): 41-45.
- [2] Liao P, Weng W A, Gao H, *et al.* Application status and development suggestion of direct-seeding rice cultivation in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(24): 4854-4870.  
廖萍,翁文安,高辉,等.我国直播稻栽培技术应用现状与发展建议.中国农业科学,2024,57(24): 4854-4870.
- [3] Chen Y B, Lai C H, Xu L Y, *et al.* Analysis of occurrence regularity of weeds in direct seeding early rice fields. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(8): 27-30.  
陈宇博,赖朝晖,许燎原,等.直播早稻杂草发生规律研究.农学学报,2015,5(8): 27-30.
- [4] Ma G L, Zhang S, Liu D C. Occurrence trend and management strategies of weeds in paddy fields under simplified and labor-saving rice cultivation. *Modern Agrochemicals*, 2024, 23(3): 8-12, 61.  
马国兰,张帅,刘都才.轻简化栽培稻田杂草发生趋势与防控技术.现代农药,2024,23(3): 8-12, 61.
- [5] Zhang H C, Gong J L. Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(7): 1273-1289.  
张洪程,龚金龙.中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨.中国农业科学,2014,47(7): 1273-1289.
- [6] Zhang J L, Wu S, Shi X G, *et al.* Influence of barnyardgrass (*Echinochloa crusgalli*) on the growth of double-cropping-paddy rice and its economic threshold. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(8): 44-52.  
张纪利,吴尚,石绪根,等.稗草对双季稻生长的影响及其防除经济阈值研究.草业学报,2015,24(8): 44-52.
- [7] Li S Y, Wang Y H, Bai L Y, *et al.* Effects of different densities of resistant and sensitive barnyardgrass on nitrogen content and the photosynthesis in rice. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(12): 2677-2682.  
李书燕,王彦辉,柏连阳,等.不同密度下抗性敏感稗草对水稻氮素水平和光合作用的影响.植物生理学报,2020,56(12): 2677-2682.
- [8] Zhu W D. Influence of barnyardgrass, *Echinochloa crusgalli*, on the growth and yield of paddy rice and its economic threshold. *Acta Phytopylacica Sinica*, 2005, 32(1): 81-86.  
朱文达.稗对水稻生长和产量性状的影响及其经济阈值.植物保护学报,2005,32(1): 81-86.
- [9] Song J S, Im J H, Park Y H, *et al.* Modeling the effects of elevated temperature and weed interference on rice grain yield. *Frontiers in Plant Science*, 2021(1): 12.

- [10] Seong K Y, Lee S B, Ku Y C, *et al.* Reason of late establishment of barnyard grass and their density effects on rice yield loss. *Korean Journal of Weed Science*, 1997, 17(4): 439–444.
- [11] Pane H, Mansor M, Watanabe H. Yield component analysis of direct seeded rice under several densities of red sprangletop [*Leptochloa chinensis* (L.) Nees] in Peninsular Malaysia. *Journal of Weed Science & Technology*, 1996, 41(3): 216–224.
- [12] Zhang Z C, Li Y F, Zhang B, *et al.* Influence of weeds in *Echinochloa* on growth and yield of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3177–3184.  
张自常, 李永丰, 张彬, 等. 稗属杂草对水稻生长发育和产量的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3177–3184.
- [13] Quan L Z, Lou Z X, Lv X L, *et al.* Multimodal remote sensing application for weed competition time series analysis in maize farmland ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118376.
- [14] Wang B Q. Research on the application of tiller control technology in high-yield rice cultivation. *Hebei Agricultural Machinery*, 2024(13): 139–141.  
王本芹. 水稻分蘖控制技术在高产栽培中的应用研究. *河北农机*, 2024(13): 139–141.
- [15] Lei X L, Liu L, Liu B, *et al.* Tillering characteristics of Indica hybrid rice under mechanized planting. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(6): 1044–1055.  
雷小龙, 刘利, 刘波, 等. 杂交籼稻机械化种植的分蘖特性. *作物学报*, 2014, 40(6): 1044–1055.
- [16] Li S Y, Yan Q L, Wang J Y, *et al.* Endophytic fungal and bacterial microbiota shift in rice and barnyardgrass grown under co-culture condition. *Plants*, 2022, 11(12): 1592.
- [17] Wu D H, Cui Y J. Effects of different cultivation methods on growth, development, and yield of rice. *Agricultural Engineering Technology*, 2016, 36(8): 27.  
伍丹华, 崔迎军. 不同栽培方式下水稻生长发育及其产量研究. *农业工程技术*, 2016, 36(8): 27.
- [18] Luo X W, Xie F P, Qu Y G, *et al.* Experimental investigation of different transplanting methods in paddy production. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 136–139.  
罗锡文, 谢方平, 区颖刚, 等. 水稻生产不同栽植方式的比较试验. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 136–139.
- [19] Reed N H, Butts T R, Norsworthy J K, *et al.* Ecological implications of row width and cultivar selection on rice (*Oryza sativa*) and barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 24844.
- [20] Chauhan B S, Johnson D E. Relative importance of shoot and root competition in dry-seeded rice growing with junglerice (*Echinochloa colona*) and ludwigia (*Ludwigia hyssopifolia*). *Weed Science*, 2010, 58(3): 295–299.
- [21] Wang W T, Long J H, Wang H X, *et al.* Insights into the effects of anilofos on direct-seeded rice production system through untargeted metabolomics. *Environmental Pollution*, 2024, 360: 124668.
- [22] Hirani A K, Korav S, Rajanna G A, *et al.* Determination of critical crop-weed competition period: Impact on growth, nutrient dynamics and productivity of green gram (*Vigna radiata*). *Heliyon*, 2024, 10(17): e36855.
- [23] Zhang Y L. The studies on the internal and external control mechanism of tiller formation in rice. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.  
张玉磊. 水稻分蘖形成的内外调控机制研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [24] Shen G H, Tian Z H, Yuan G H, *et al.* Enhancing large-scale rice yield through effective weed control in paddy fields. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2025(2): 1–5.  
沈国辉, 田志慧, 袁国徽, 等. 做好稻田杂草防控助力水稻大面积单产提升. *上海农业科技*, 2025(2): 1–5.
- [25] Wang J Y, Li S Y, Tong J H, *et al.* A preliminary study on response of allelopathic and non-allelopathic rice to barnyardgrass competition at the seedling stage. *Life Science Research*, 2022, 26(5): 396–400.  
王婕妤, 李书燕, 童建华, 等. 幼苗期化感水稻与非化感水稻响应稗草胁迫的初步研究. *生命科学研究*, 2022, 26(5): 396–400.
- [26] Bai L Y, Zhang S, Liu D C. Monitoring and control technologies for herbicide resistance in farmland weeds. Beijing: China Agriculture Press, 2023: 79–86.  
柏连阳, 张帅, 刘都才. 农田杂草抗药性监测与防控技术. 北京: 中国农业出版社, 2023: 79–86.
- [27] Mahajan G, Ramesha M S, Chauhan B S. Response of rice genotypes to weed competition in dry direct-seeded rice in India. *The Scientific World Journal*, 2014(9): 641589.
- [28] Zhang L, Chen K, Li T R, *et al.* Metabolomic and transcriptomic analyses of rice plant interaction with invasive weed *Leptochloa chinensis*. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1271303.
- [29] Guo L B, Qiu J, Li L F, *et al.* Genomic clues for crop-weed interactions and evolution. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(12): 1102–1115.