

易军, 符慧娟, 李星月, 李其勇, 朱从桦, 张鸿. 耕作与肥药减量化方式对水稻田间病虫害及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (1): 42-51
Yi J, Fu HJ, Li XY, Li QY, Zhu CH, Zhang H. Effects of tillage practice and fertilizer and pesticide reductions on diseases, pests, weeds, and yield of rice [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29 (1): 42-51

耕作与肥药减量化方式对水稻田间病虫害及产量的影响

易军¹ 符慧娟¹ 李星月¹ 李其勇¹ 朱从桦³ 张鸿²✉

¹四川省农业科学院植物保护研究所/农业农村部西南作物有害生物综合治理重点实验室 成都 610066

²四川省农业科学院 成都 610066

³四川省农业科学院作物研究所 成都 610066

摘要 为了明确在不同耕作方式下, 肥料与农药的减量化方式对水稻田间病虫害发生及水稻干物质转运和产量的影响, 采用裂区设计, 主区为耕作防治杂草方式 (浅旋+常规除草剂用量、深耕+70%常规除草剂用量), 副区为喷施植物生长调节剂防治病虫害方式 (常规病虫害药剂用量、S-诱抗素+70%病虫害药剂用量、植物激活蛋白+70%病虫害药剂用量), 副副区为施肥方式 (传统化肥施用、有机无机复混缓释肥施用下减氮20%), 研究田间病虫害发生、水稻干物质积累与转运、产量及构成因素与肥药减量化措施间的关系。结果表明, 在深耕且减少30%除草剂用量下, 分蘖期田间的莎草科、禾本科和阔叶类杂草发生显著低于常规除草剂用量的浅旋耕作, 成熟期水稻干物质质量较浅旋耕作高2.4%-16.2%。喷施S-诱抗素或施用有机无机复混缓释肥有利于分蘖期田间杂草发生, 但水稻植株稻曲病发生减轻8.2%-17.2%, 齐穗期至成熟期干物质输出和转化高。相关性分析表明, 水稻产量与杂草和稻曲病的发生呈极显著或显著负相关, 与叶片和茎鞘的干物质输出量呈显著正相关。喷施植物生长调节剂且减少30%的化学农药用量, 或施用有机无机复混缓释肥且减少20%的氮投入, 均未显著影响水稻产量; 深耕耕作方式下喷施S-诱抗素处理的水稻产量表现最好。本研究表明, 通过深耕、施用植物生长调节剂或有机无机复混缓释肥等方式结合, 能有效地控制田间杂草, 提高水稻干物质积累量与转运量。在减少水稻的化学药剂与肥料用量的同时, 实现水稻的稳产增效。(图1 表6 参40)

关键词 水稻; 耕作方式; 肥药减量; 植物生长调节剂; 有机无机复混缓释肥; 产量

Effects of tillage practice and fertilizer and pesticide reductions on diseases, pests, weeds, and yield of rice

YI Jun¹, FU Huijuan¹, LI Xingyue¹, LI Qiyong¹, ZHU Conghua³ & ZHANG Hong²✉

¹Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Southwest of Ministry of Agriculture, Chengdu 610066, China

²Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

³Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

Abstract A split-split field test was conducted to study how fertilizer and pesticide reductions affect diseases, pests, weeds, and rice yield under different tillage treatments. Two cultivation methods for weed control (shallow rotary tillage with conventional herbicide amounts and deep tillage with 30% less herbicide; main factor), three growth regulator spraying methods for disease and pest control (conventional insecticide and fungicide dosage, trans-abscisic acid application with 30% less insecticide and fungicide, and plant activator protein with 30% less insecticide and fungicide; sub-plot factor), and two fertilization methods (traditional chemical fertilizer application and organic-inorganic mixed slow-release fertilizer application with 20% less nitrogen; split-split plot factor) were used to investigate the relationship between the occurrence of rice diseases, pests, weeds, dry matter accumulation and transportation, yield, and fertilizer- and pesticide-reduction methods. The results showed that, compared to shallow rotary tillage, deep tillage with 30% less herbicide significantly decreased the occurrence of Cyperaceae, gramineous, and broadleaf weeds in the rice field at the tillering stage and increased the dry matter accumulation of rice by 2.4%–16.2% at the maturity stage. Trans-abscisic acid or organic-inorganic

收稿日期 Received: 2021-10-26 接受日期 Accepted: 2022-01-07

四川省财政自主创新专项项目 (2022ZZCX019)、农业农村部公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201503127)、四川省科技计划项目 (21ZDYF2184, 21RCYJ0024) 和四川省农业科学院前沿学科研究基金项目 (2019QYXK027) 资助 Supported by the Sichuan Provincial Financial Independent Innovation Project (2022ZZCX019), Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503127), Sichuan Science and Technology Program (21ZDYF2184, 21RCYJ0024), and Research Fund for Frontier Subject of Sichuan Academy of Agricultural Sciences (2019QYXK027)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: zhh503@163.com)

mixed slow-release fertilizer application was beneficial to the occurrence of weeds in rice fields. However, occurrence of rice false smut decreased by 8.2%–17.2%, and dry matter export and transformation were higher from the full heading to maturity stages than those of other treatments. Correlation analysis showed that rice yield was significantly or very significantly negatively correlated with the occurrence of weeds and rice false smut and was significantly positively correlated with the dry matter export from leaves and stem sheaths. In addition, no effect on rice yield was observed when strategies such as spraying of plant growth regulators or application of organic-inorganic mixed slow-release fertilizer were employed with 30% less pesticide or 20% less nitrogen; however, the rice yield was better after spraying trans-abscisic acid under deep tillage. These results suggest that the combination of deep tillage, spraying of plant growth regulators, or application of organic-inorganic mixed slow-release fertilizer could effectively control weeds in the rice fields and increase the amount of dry matter accumulation and transportation. In addition, reducing the amount of chemicals and fertilizers used in rice production would allow the yield to remain stable.

Keywords rice; cultivation method; fertilizer and pesticide reduction; plant growth regulator; organic-inorganic mixed slow-release fertilizer; yield

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是四川盆地种植面积与产量第一的粮食作物, 常年因受到病虫草等危害出现不同程度的减产^[1]. 有效控制病虫草害则是保证水稻高产与稳产的重要措施之一. 化学农药因在病虫草害防治方面具有见效快、易操作等特点, 已成为控制水稻田间病虫草害和保障粮食安全的重要手段之一. 化肥作为另一种重要的农业生产资料, 在水稻增产方面也发挥着重要作用^[2]. 过量以及不合理的化肥和农药投入导致了肥药利用率降低、病虫草抗药性增加、生态环境破坏以及稻米质量和安全等一系列问题^[3-4]. 实行水稻生产的肥药“双减”, 降低肥药使用量, 提高其利用效率, 同时发展化肥农药替代技术, 对保障水稻生产与质量和农业生态安全等具有重要意义.

植物生长调节剂是人工合成的对植物生长发育具有调节作用的一类物质. 合理施用植物激活蛋白或激素等植物生长调节剂能有效提高作物自身免疫能力, 增强作物对病虫害及其他不利环境因素的抵抗能力^[5]. Alazem等发现外源脱落酸可以诱导拟南芥 [*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.] 对竹叶花叶病毒BaMV的抗性^[6]. Liu等发现外源脱落酸可以促进水稻叶鞘部分胼胝质的生成, 胼胝质能有效阻碍褐飞虱 [*Nilaparvata lugens* (Stal)]、叶蝉 (*Cicadellidae*) 等刺吸式口器昆虫取食, 过量的胼胝质累积有利于提高水稻抗虫性^[7]. 合理施用缓释肥、有机肥等也是提高作物抗逆能力和产量以及改善品质的有效栽培措施之一. 缓释肥因其缓慢释放养分的特性, 基本能满足作物不同生长阶段的养分需求. 大量研究表明, 施用缓释肥可以显著降低稻田表土层铵态氮含量, 减少肥料损失, 提高肥料利用率, 增加水稻产量^[8-10]. 有机肥与无机肥配施也能提高双季稻产量和氮肥利用效率, 且不同的配施比例或有机肥腐熟程度间存在显著差异^[11-12]. 深耕耕作能够拓展土壤耕层深度, 通过改善耕层土壤物理性状和减少土传病虫害发生, 提高土壤保水能力和促进作物生长与增产^[13-14]. 稻田病虫草害发生和水稻植株干物质积累与分配等受到耕作方式、化肥和农药施用等栽培管理方式等因素的影响. 关于化肥和农药减施对水稻的肥药利用率和产量等方面研究^[15-17]已有较多报道, 但同时结合耕作方式、植物生长调节剂和有机无机混合缓释肥施用等稻田管理措施, 探究肥药用量对稻田病虫草害发生和水稻产量形成的影响鲜见报道, 限制了不同肥药减量化配套措施的推广使用. 我们通过研究在不同耕作方式下, 植物生长调节剂和肥料类型与不同病虫草

害药剂用量配合处理的方式对田间病虫草害发生、水稻干物质积累与转运以及产量和产量构成的影响, 以期稻田化肥农药减施增效及绿色防治技术的选择提供理论基础与实践依据.

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2020年4-9月, 在四川省农业科学院广汉市西高水稻试验示范基地 (104°18'E, 31°05'N) 进行, 前茬为冬小麦 (*Triticum aestivum* L.). 试验地位于成都平原东北部, 属四川盆地中亚热带湿润气候区, 夏季高温多雨; 二化螟 (*Chilo suppressalis*)、稻飞虱、稻瘟病、稻曲病、纹枯病等为该地区主要病虫害, 当地病虫草害防治主要以化学方式防治为主. 试验地为水稻土, 土壤0-20 cm耕层含有机质35.8 g/kg, 全氮2.32 g/kg, 全磷0.74 g/kg, 全钾12.6 g/kg, 速效氮182.0 mg/kg, 速效磷19.9 mg/kg, 速效钾102 mg/kg.

1.2 试验材料

供试品种为‘川康优丝苗’, 三系杂交籼稻, 全生育期149 d左右.

1.3 试验设计

试验采用裂区设计, 主区为耕作方式防治杂草处理 (C1, 浅旋+常规除草剂用量; C2, 深耕+70%常规除草剂用量), 副区为喷施植物生长调节剂防治病虫害处理 (G1, 常规病虫害药剂用量; G2, S-诱抗素 (天然脱落酸)+70%病虫害药剂用量; G3, 植物激活蛋白+70%病虫害药剂用量), 副副区为施肥处理 (F1, 传统施肥; F2, 有机无机复混缓释肥施用下减氮20%), 共计12个处理 (表1), 每处理重复3次, 共计36个小区, 小区面积为49 m². 小区间筑高30 cm、宽30 cm的田埂并覆塑料膜, 各小区独立排灌.

传统施肥方式, 氮肥分为基肥、蘖肥和穗肥, 施肥比例为5:3:2, 总施氮量 (尿素, 含N 46%) 为180 kg/hm². 缓释肥施肥方式, 采用水稻专用有机无机复混缓释肥 (四川鹤岛农业科技有限公司生产, 含有机质15%, N:P₂O₅:K₂O为20:5:5). 缓释肥采用一次性基施, 总施氮量为144 kg/hm². 两种施肥方式中, 磷肥用量均为90 kg/hm², 全部作基肥施入; 钾肥用量均为180 kg/hm², 按照基肥:穗肥 = 1:1施用. 过磷酸钙 (含P₂O₅ 12%) 和氯化钾 (含K₂O 60%) 作为传统施肥处理的磷肥

和钾肥,以及缓释肥施用处理的磷肥和钾肥不足部分施用。基肥于插秧前1 d撒施,分蘖肥在移栽后第7天撒施,穗肥在主茎倒3叶期撒施。

4月10日播种,早育苗。5月22日按试验处理进行耕地和基肥撒施,浅旋耕深12-15 cm或深耕耕深25-27 cm。5月23日移栽,移栽时秧苗叶龄均为四叶一心,栽插规格为30.0 cm × 20.0 cm,每穴两苗。移栽7 d后,按试验处理施用分蘖肥;G2和G3处理分别喷施300 L/hm²含600 mL/hm² S-诱抗素(四川龙蟒福生科技有限责任公司生产,有效成分含量0.1%)或15 g/hm²植物激活蛋白(北京中捷四方生物科技股份有限公司生产,大丽轮枝菌激活蛋白VdAL)的水溶液,G1处理喷施等量清水。移栽后10 d,喷施除草剂:常规除草剂用量为979.5 mL/hm²氯氟吡氧乙酸乳油(江苏富田农化有限公司生产,有效成分含量20%)、2 239.5 mL/hm²五氟磺草胺可分散油悬浮剂(陶氏益农农业科技有限公司生产,含五氟磺草胺10 g/L,氟磺草胺50 g/L)和1 120.5 mL/hm²噻唑酰草胺乳油(江苏富田农化有限公司生产,有效成分含量10%)。7月21日,各小区按试验处理追施穗肥。7月27日,喷施防病虫药剂,常规病虫药剂用量为150 g/hm²福戈水分散粒剂(先正达南通作物保护有限公司生产,含20%氯虫苯甲酰胺和20%噻虫嗪),750 g/hm² 20%的烯肟·戊唑醇悬浮剂(沈阳科创化学品有限公司生产,含烯肟菌胺10%和戊唑醇10%),600 g/hm²三环唑悬浮剂(浙江省桐庐汇丰生物科技有限公司生产,有效成分含量40%)。9月22日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 杂草生长和防治情况调查 水稻分蘖盛期,参照刁春友等方法^[18],在各小区内5点取样。每点调查0.5 m × 0.5 m内的杂草发生情况,即各小区莎草科(Cyperaceae)

[如异型莎草(*Cyperus difformis*)、牛毛毡(*Eleocharis yokoscensis*)等]、阔叶[野慈姑(*Sagittaria trifolia*)、眼子菜(*Potamogeton distinctus*)、鸭舌草(*Monochoria vaginalis*)、雨久花(*Monochoria korsakowii*)等]和禾本科(Gramineae)[稗草(*Echinochloa crusgalli*)、千金子(*Leptochloa chinensis*)等]等杂草的单位面积株数和鲜重。

1.4.2 病虫害发生调查 参照刁春友等的方法^[18],在各调查区内5点取样,每点调查相邻的10穴水稻植株,按试验进度调查稻瘟病(叶瘟和穗颈瘟)、稻曲病、纹枯病等病害和二化螟、稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)、稻飞虱等虫害(试验年度,稻曲病发生较为突出,其他病虫害发生较轻或基本未发生,文中仅对稻曲病进行统计分析)。在黄熟期调查稻曲病的病穗率和病粒率。

1.4.3 干物质测定 分别于齐穗期和成熟期,每小区按照平均分蘖数选取有代表性植株3穴,分成叶片、茎鞘和穗等部分装袋,105 ℃下杀青30 min后,80 ℃烘干至恒重,称重后按刘琦等方法^[19]计算各处理植株的干物质积累与分配情况。

1.4.4 产量和产量构成 于成熟期每小区按平均穗数取样法取9穴代表性植株,调查各处理植株的有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重等产量构成指标;选取15 m²进行人工脱

表1 不同肥药减量栽培管理方式

Table 1 Cultivation management methods of different fertilizer and pesticide reduction treatments

处理 Treatment	耕作方式 Cultivation method (C)	生长调节剂类型 Growth regulator type (G)	施肥方式 Fertilization method (F)
T1 (C1G1F1)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (C1)	激活蛋白+70%病虫药剂用量 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G1)	传统施肥 Traditional fertilization (F1)
T2 (C1G1F2)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (C1)	激活蛋白+70%病虫药剂用量 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G1)	缓释肥施用下减氮20% Slow-release fertilizer application with 20% reduction of nitrogen (F2)
T3 (C1G2F1)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (C1)	S-诱抗素+70%病虫药剂用量 Absciscic acid application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G2)	传统施肥 Traditional fertilization (F1)
T4 (C1G2F2)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (C1)	S-诱抗素+70%病虫药剂用量 Absciscic acid application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G2)	缓释肥施用下减氮20% Slow-release fertilizer application with 20% reduction of nitrogen (F2)
T5 (C1G3F1)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (C1)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (G3)	传统施肥 Traditional fertilization (F1)
T6 (C1G3F2)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (C1)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (G3)	缓释肥施用下减氮20% Slow-release fertilizer application with 20% reduction of nitrogen (F2)
T7 (C2G1F1)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (C2)	激活蛋白+70%病虫药剂用量 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G1)	传统施肥 Traditional fertilization (F1)
T8 (C2G1F2)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (C2)	激活蛋白+70%病虫药剂用量 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G1)	缓释肥施用下减氮20% Slow-release fertilizer application with 20% reduction of nitrogen (F2)
T9 (C2G2F1)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (C2)	S-诱抗素+70%病虫药剂用量 Absciscic acid application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G2)	传统施肥 Traditional fertilization (F1)
T10 (C2G2F2)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (C2)	S-诱抗素+70%病虫药剂用量 Absciscic acid application with 30% reduction of insecticides and fungicides (G2)	缓释肥施用下减氮20% Slow-release fertilizer application with 20% reduction of nitrogen (F2)
T11 (C2G3F1)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (C2)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (G3)	传统施肥 Traditional fertilization (F1)
T12 (C2G3F2)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (C2)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (G3)	缓释肥施用下减氮20% Slow-release fertilizer application with 20% reduction of nitrogen (F2)

粒，按标准含水量13.5%计算单位面积产量。

1.5 数据计算与分析

稻曲病病穗率=病穗数总穗数/调查总穗数×100%;

稻曲病病粒率=病粒数总粒数/调查总粒数×100%;

叶片(茎鞘)干物质输出量(t/hm²)=齐穗期叶片(茎鞘)干重-成熟期叶片(茎鞘)干重;

叶片(茎鞘)干物质输出率=叶片(茎鞘)干物质输出量/齐穗期叶片(茎鞘)干重×100%;

叶片(茎鞘)干物质转化率=叶片(茎鞘)干物质输出量/(成熟期穗干重-齐穗期穗干重)×100%。

运用Microsoft Excel和Origin 9.0进行数据整理和图表制作,采用SPSS 22.0软件分析数据, LSD法进行样本平均数的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 耕作方式与肥药减量对分蘖期杂草发生的影响

从表2可以看出,耕作方式和植物生长调节剂处理以及二者互作均显著或极显著影响分蘖期田间莎草科、阔叶类和禾本科杂草株数和鲜重;施肥方式也显著影响或极显著影响杂草株数和鲜重。在深耕处理下,田间的莎草科、阔叶类和禾本科杂草的平均株数分别较浅旋处理低82.1%、75.3%和66.0%;莎草科、阔叶类和禾本科杂草的平均鲜重分别较浅旋处理低97.7%、90.0%和83.6%。表明深耕处理能减少水稻田间的莎草科、阔叶类和禾本科杂草发生,从而有利于水稻生长发育。

喷施S-诱抗素下,田间杂草平均株数和鲜重最高;与喷施清水相比,莎草科、阔叶类和禾本科杂草平均株数分别高0.7倍、1.6倍和2.1倍;平均鲜重分别高2.0倍、12.5倍和7.1倍。在施用缓释肥下,莎草科、阔叶类和禾本科杂草平均株数和鲜

重最高;其中,平均株数分别较施用传统施肥处理高47.5%、20.3%和52.9%,平均鲜重分别高31.0%、15.6%和54.6%。表明S-诱抗素和缓释肥的施用在一定程度上均促进了水稻分蘖期田间杂草的生长。

2.2 耕作方式与肥药减量对稻曲病发生的影响

如图1所示,施肥方式显著影响水稻植株的稻曲病病穗率,植物生长调节剂类型显著影响稻曲病病粒率。在缓释肥施用下,水稻植株的平均病穗率较传统施肥下降8.2%;喷施S-诱抗素和杀虫药剂减量30%处理下,水稻植株的平均病粒率较喷施激活蛋白和常规药剂用量处理分别低17.2%和15.6%。综上表明,施用缓释肥或喷施S-诱抗素有助于减少稻曲病发生,且喷施S-诱抗素后减少孕穗期杀虫药剂施用量对防治稻曲病发生仍较好。

2.3 耕作方式与肥药减量对干物质积累与转运的影响

在齐穗期,耕作方式和施肥方式显著影响茎鞘干物质质量和地上部总干物质质量,而生长调节剂类型显著影响叶片、穗干物质质量和地上部总干物质质量(表3)。T10处理的地上部总干物质质量最高,较最低的T1处理显著高19.1%。深耕耕作处理下,水稻植株的茎鞘干物质质量较浅旋耕作高2.4%-16.2%;施用缓释肥处理下,茎鞘干物质质量较传统施肥高3.6%-20.8%。喷施S-诱抗素且杀虫药剂减量30%处理下,水稻的叶和穗干物质质量较常规药剂用量处理分别高18.8%和27.4%。在成熟期,耕作方式显著影响水稻植株地上部总干物质质量和各器官干物质质量;生长调节剂类型显著影响茎鞘干物质质量。深耕耕作处理下,水稻植株的平均叶片、茎鞘、穗干物质质量和地上部总干物质质量较浅旋耕作处理高12.1%、7.2%、5.0%和6.6%。喷施S-诱抗素且杀虫药剂减量30%处理较常规药剂用量处理的茎鞘干物质质量高5.1%。而在不同施肥方式处理下,成熟期水稻植株叶片、茎鞘和穗的干物质质量间均没有显著差异。

由表4可知,耕作方式、生长调节剂类型和施肥方式均显

表2 耕作方式与肥药减量对分蘖期田间杂草的影响

Table 2 Effects of cultivation methods and fertilizer and pesticide reduction on weed in rice field at tillering stage

处理 Treatment	杂草株数 Weed number (n/plants m ⁻²)			杂草鲜重 Weed fresh weight (m/g m ⁻²)		
	莎草科 Cyperaceae	阔叶类 Broadleaf	禾本科 Gramineae	莎草科 Cyperaceae	阔叶类 Broadleaf	禾本科 Gramineae
T1	29.8 ± 7.8b	8.0 ± 1.5b	1.3 ± 0.6cd	36.5 ± 5.6c	4.0 ± 0.6b	0.8 ± 0.4c
T2	25.8 ± 3.4bc	10.2 ± 1.9ab	1.1 ± 0.2cd	22.2 ± 5.9d	4.4 ± 0.2b	0.8 ± 0.4c
T3	86.2 ± 7.3a	9.3 ± 2.0b	10.2 ± 3.2b	81.6 ± 10.9a	3.8 ± 0.3b	12.8 ± 3.3b
T4	88.9 ± 11.5a	13.8 ± 3.2a	13.3 ± 2.9a	87.6 ± 13.9a	5.6 ± 0.8a	18.0 ± 2.3a
T5	10.2 ± 1.4def	0.9 ± 0.2c	1.1 ± 0.2cd	3.6 ± 0.5e	0.1 ± 0.1d	0.2 ± 0.0c
T6	78.2 ± 11.6a	4.0 ± 1.0c	1.3 ± 0.3cd	51.0 ± 4.4b	0.3 ± 0.1cd	0.5 ± 0.2c
T7	4.0 ± 1.2ef	0.9 ± 0.2c	0.0 ± 0.0d	0.6 ± 0.1e	0.2 ± 0.0d	0.0 ± 0.0c
T8	1.1 ± 0.2f	0.4 ± 0.1c	1.1 ± 0.2cd	0.3 ± 0.1e	0.1 ± 0.0d	0.3 ± 0.1c
T9	10.7 ± 1.8def	3.1 ± 0.8c	0.0 ± 0.0d	1.6 ± 0.3e	1.0 ± 0.4c	0.0 ± 0.0c
T10	12.4 ± 3.8de	1.3 ± 0.3c	2.7 ± 0.6cd	1.6 ± 0.7e	0.2 ± 0.1d	1.8 ± 0.3c
T11	11.1 ± 2.8def	4.0 ± 1.0c	2.4 ± 0.4cd	1.1 ± 0.4e	0.3 ± 0.1cd	1.3 ± 0.1c
T12	17.8 ± 4.9cd	1.8 ± 0.4c	3.6 ± 1.3c	1.1 ± 0.4e	0.2 ± 0.0d	2.0 ± 0.2c
F值 F-value	耕作方式 Cultivation method (C)	3551.2**	55.1*	45.2*	617.0**	703.0**
	生长调节剂类型 Growth regulator type (G)	91.7**	22.3**	36.3**	61.2**	151.0**
	施肥方式 Fertilization method (F)	32.8**	7.6*	36.0**	19.2**	7.8*
	C × G	60.5**	36.5**	42.6**	57.8**	134.6**
	C × F	23.5**	54.3**	1.6	19.9**	19.4**
	G × F	36.8**	0.6	12.7**	38.0**	1.2
	C × G × F	23.8**	2.6	1.5	37.4**	8.6**

T1-T12处理描述见表1。 同列不同小写字母表示不同肥药减量化方式处理间差异显著 (P < 0.05)。 *和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。 下同。
The meanings of T1-T12 are shown in the table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level among different fertilizer and pesticide reduction methods. * and ** mean significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below.

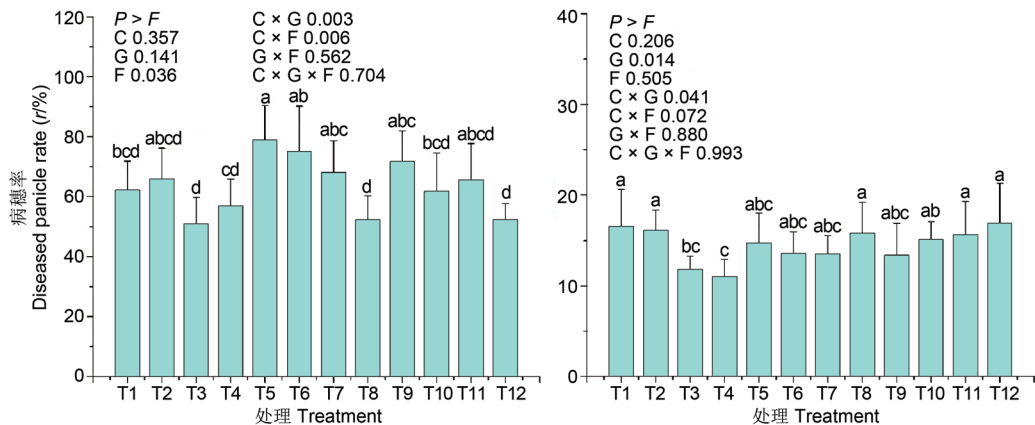


图1 田间稻曲病发生情况。T1-T12处理描述见表1。C: 耕作方式; G: 生长调节剂类型; F: 施肥方式。不同小写字母表示在不同肥药减量化方式处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 The occurrence of rice smut in the field. The meanings of T1-T12 are shown in the table 1. C: Cultivation method; G: Growth regulator type; F: Fertilization method. Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level among different fertilizer and pesticide reduction methods.

表3 耕作方式与肥药减量对水稻干物质积累的影响

Table 3 Effects of cultivation methods and fertilizer and pesticide reduction on dry matter accumulation of rice

处理 Treatment	齐穗期 Full heading stage				成熟期 Maturity stage			
	叶 Leaf (m/t hm ⁻²)	茎鞘 Stem-sheath (m/t hm ⁻²)	穗 Panicle (m/t hm ⁻²)	地上部 Above ground (m/t hm ⁻²)	叶 Leaf (m/t hm ⁻²)	茎鞘 Stem-sheath (m/t hm ⁻²)	穗 Panicle (m/t hm ⁻²)	地上部 Above ground (m/t hm ⁻²)
T1	3.34 ± 0.16bc	6.86 ± 0.26c	1.98 ± 0.12a	12.18 ± 0.25e	2.18 ± 0.15abc	3.81 ± 0.17d	8.96 ± 0.47abc	14.95 ± 0.56cd
T2	3.56 ± 0.59abc	7.30 ± 0.90bc	2.12 ± 0.35abcd	12.98 ± 1.82abcde	2.02 ± 0.20cd	4.12 ± 0.31cd	8.37 ± 0.44bc	14.52 ± 0.53d
T3	3.84 ± 0.21ab	7.46 ± 0.31abc	2.58 ± 0.09a	13.87 ± 0.32abcd	2.04 ± 0.11bcd	4.10 ± 0.26cd	9.03 ± 1.09abc	15.18 ± 1.42bcd
T4	3.94 ± 0.14a	7.78 ± 0.32abc	2.56 ± 0.12bcd	14.29 ± 0.44abc	2.05 ± 0.10bcd	4.18 ± 0.23bcd	8.25 ± 0.66c	14.48 ± 0.67d
T5	3.16 ± 0.09c	6.89 ± 0.31c	1.85 ± 0.33cd	11.90 ± 0.69e	1.89 ± 0.11d	4.03 ± 0.22cd	9.05 ± 1.15abc	14.97 ± 1.24cd
T6	3.33 ± 0.40bc	7.14 ± 0.75bc	2.20 ± 0.35abcd	12.66 ± 1.44cde	1.89 ± 0.23d	4.27 ± 0.51abc	9.14 ± 0.92abc	15.30 ± 1.4bcd
T7	3.51 ± 0.40abc	7.02 ± 1.15c	2.29 ± 0.25abcd	12.82 ± 1.79bcde	2.19 ± 0.26abc	4.37 ± 0.42abc	9.12 ± 1.10abc	15.68 ± 1.71abcd
T8	3.58 ± 0.36abc	8.48 ± 0.66a	2.33 ± 0.14abc	14.39 ± 0.5ab	2.33 ± 0.23a	4.51 ± 0.45ab	9.41 ± 0.95ab	16.25 ± 1.55abc
T9	3.85 ± 0.14ab	7.69 ± 0.38abc	2.47 ± 0.26ab	14.01 ± 0.48abc	2.28 ± 0.29a	4.51 ± 0.26ab	9.77 ± 1.00a	16.56 ± 1.43ab
T10	3.95 ± 0.04a	8.12 ± 0.61ab	2.45 ± 0.23ab	14.51 ± 0.8a	2.25 ± 0.13ab	4.62 ± 0.52a	9.92 ± 0.82a	16.79 ± 1.22a
T11	3.09 ± 0.24c	7.27 ± 0.80bc	1.94 ± 0.10abcd	12.29 ± 0.46de	2.20 ± 0.15abc	4.17 ± 0.28bcd	8.67 ± 0.75bc	15.03 ± 0.92cd
T12	3.55 ± 0.37abc	7.60 ± 0.66abc	1.90 ± 0.11d	13.04 ± 0.47abcde	2.28 ± 0.22a	4.11 ± 0.34cd	8.57 ± 1.22bc	14.96 ± 1.67cd
耕作方式 Cultivation method (C)	1.8	16.3*	0.0	5.6*	80.0**	11.1*	11.9*	22.4**
生长调节剂类型 Growth regulator type (G)	20.2**	2.7	15.4**	11.1**	1.8	5.3*	1.0	1.9
施肥方式 Fertilization method (F)	2.5	7.5*	1.1	8.1*	0.0	3.3	0.5	0.0
C × G	0.1	0.3	2.4	0.7	1.2	8.0**	4.7*	4.1*
C × F	0.0	1.1	1.3	0.3	2.0	0.9	1.5	0.7
G × F	0.3	1.1	0.5	0.6	0.2	0.3	0.2	0.1
C × G × F	0.3	0.6	0.6	0.2	1.6	0.4	0.7	0.6

同列不同小写字母表示不同肥药减量化方式处理间差异显著 ($P < 0.05$)。*和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。
Different lowercases indicate significant difference at the 0.05 level among different fertilizer and pesticide reduction methods. * and ** mean significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

著或极显著影响叶片干物质输出和转化。浅旋耕作下,水稻植株平均叶片干物质输出量、输出率和转化率分别较深耕耕作处理高13.8%、16.0%和22.7%。喷施S-诱抗素且杀虫药剂减量30%处理的叶片干物质输出量、输出率和转化率分别较常规药剂用量处理高43.3%、20.9%和48.1%,且较喷施激活蛋白处理高32.0%、18.7%和34.5%。缓释肥施用下,水稻植株平均叶片干物质输出量、输出率和转化率较传统施肥处理高13.2%、8.2%和17.5%。此外,三者互作也显著或极显著影响叶片干物质的输出。其中,在浅旋耕作、喷施S-诱抗素和施用缓释肥的T4处理下,水稻植株叶片干物质输出量、输出率和转

化率均最高,分别较最低的T11处理高1.1倍、0.7倍和1.5倍。在茎鞘干物质积累与转运方面,施肥方式显著或极显著影响茎鞘干物质的输出量、输出率和转化率;生长调节剂类型极显著影响茎鞘输出量。缓释肥施用下,水稻植株平均茎鞘干物质的输出量、输出率和转化率较传统施肥处理高13.2%、5.2%和17.4%。喷施S-诱抗素且杀虫药剂减量30%处理的茎鞘干物质的输出量较常规药剂用量处理高10.6%。其中,T8处理的茎鞘干物质输出最高,输出量和输出率分别较最低的T7处理高49.7%和24.0%;T4处理的茎鞘干物质转化率最高,较最低的T7处理的58.3%。

表4 耕作方式与肥药减量对水稻干物质输出和转化的影响

Table 4 Effects of cultivation methods and fertilizer and pesticide reduction on dry matter exportation and transformation of rice

处理 Treatment	叶 Leaf			茎鞘 Stem-sheath		
	输出量 Exportation amount (m/t hm ⁻²)	输出率 Exportation rate (r/%)	转化率 Transformation rate (r/%)	输出量 Exportation amount (m/t hm ⁻²)	输出率 Exportation rate (r/%)	转化率 Transformation rate (r/%)
T1	1.16 ± 0.15g	34.73 ± 4.54de	16.75 ± 2.84ef	3.04 ± 0.17de	44.38 ± 2.45abc	43.73 ± 3.38cde
T2	1.53 ± 0.20cde	43.10 ± 5.63abc	24.76 ± 4.58bc	3.18 ± 0.31cde	43.54 ± 4.19abc	50.91 ± 4.27bcde
T3	1.79 ± 0.11ab	46.74 ± 2.89ab	28.57 ± 5.92ab	3.36 ± 0.26bcd	45.01 ± 3.49abc	53.68 ± 11.91abcd
T4	1.89 ± 0.10a	48.00 ± 2.49a	33.62 ± 3.87a	3.60 ± 0.23ab	46.27 ± 3.00ab	63.90 ± 7.62a
T5	1.27 ± 0.11fg	40.28 ± 3.40cd	18.21 ± 3.98def	2.86 ± 0.22ef	41.55 ± 3.21bcd	40.58 ± 7.10e
T6	1.43 ± 0.23def	43.11 ± 6.88abc	21.25 ± 5.77cde	2.87 ± 0.51ef	40.18 ± 7.17cd	42.19 ± 10.41de
T7	1.32 ± 0.26efg	37.71 ± 7.28cd	20.21 ± 6.93cde	2.65 ± 0.42f	37.76 ± 6.02d	40.37 ± 12.50e
T8	1.25 ± 0.23fg	34.89 ± 6.50de	18.14 ± 4.92def	3.97 ± 0.45a	46.81 ± 5.36a	57.46 ± 12.94ab
T9	1.57 ± 0.29bcd	40.80 ± 7.41bcd	22.38 ± 7.90cde	3.18 ± 0.26cde	41.38 ± 3.39bcd	44.70 ± 10.55cde
T10	1.70 ± 0.13abc	42.97 ± 3.39abc	22.85 ± 2.27bcd	3.50 ± 0.52bc	43.06 ± 6.38abc	47.91 ± 12.74bcde
T11	0.88 ± 0.15h	28.66 ± 4.98e	13.31 ± 2.92f	3.10 ± 0.28de	42.69 ± 3.90abcd	46.72 ± 7.71bcde
T12	1.26 ± 0.22fg	35.59 ± 6.29d	19.77 ± 6.14cde	3.49 ± 0.34bc	45.96 ± 4.53ab	54.43 ± 13.97abc
F值 F-value	耕作方式 Cultivation method (C)	31.0**	57.1**	31.5**	3.4	0.2
	生长调节剂类型 Growth regulator type (G)	39.8**	11.1**	18.1**	12.2**	1.1
	施肥方式 Fertilization method (F)	19.4**	7.5*	8.4**	28.1**	4.9*
	C × G	1.6	1.9	2.8	9.3**	8.1**
	C × F	0.7	0.8	2.4	13.1**	6.4*
	G × F	1.4	0.7	0.3	4.8*	1.0
	C × G × F	6.0**	4.2*	2.6	4.8*	1.9

同列不同小写字母表示不同肥药减量化方式处理间差异显著 ($P < 0.05$)。*和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。
Different lowercases indicate significant difference at the 0.05 level among different fertilizer and pesticide reduction methods. * and ** mean significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

以上结果表明,不同类型的生长调节剂主要通过影响水稻干物质输出和转化来影响水稻成熟期的干物质量。施用缓释肥处理下,水稻植株在齐穗期的干物质量较高,且齐穗期至成熟期的干物质输出和转化也较高。深耕处理则主要通过影响齐穗期至成熟期的叶片干物质转运来影响水稻植株成熟期的干物质量。

2.4 耕作方式与肥药减量对产量和产量构成的影响

从表5可以看出,耕作方式和生长调节剂类型显著影响水稻植株的有效穗数和结实率;施肥方式显著或极显著影响每穗粒数和千粒重;而各处理方式及其互作对水稻植株产量没有显著影响。深耕处理下水稻植株的有效穗数较浅旋处理高0.7%-9.0%,结实率较浅旋处理高0.2%-9.2%。喷施激活蛋白和S-诱抗素处理的水稻植株有效穗数分别较未喷施生长调节剂处理高6.3%和5.4%;喷施S-诱抗素处理的水稻植株结实率分别较喷施激活蛋白和未喷施生长调节剂处理的水稻植株高4.7%和3.6%。缓释肥施用处理的水稻植株每穗粒数较传统施肥处理低3.3%-8.9%;千粒重较传统施肥处理高1.2%。在各产量性状表现上,T7处理的水稻植株有效穗数最高,较最低的T5处理显著高14.9%;T3处理的水稻植株每穗粒数最高,较最低的T12处理显著高13.4%;T12处理的水稻植株结实率最高,较最低的T1处理显著高11.6%;T6和T10处理的水稻植株千粒重最高,较最低的T5处理显著高3.4%。此外,各处理间在产量方面没有显著差异,说明通过喷施植物生长调节剂且减少30%的化学农药用量,以及施用缓释肥且减少20%的氮投入时,并未显著影响水稻产量。特别地,从表6可以看出,水稻植株的产量与杂草发生和稻曲病发生呈极显著或显著负相关,与叶片和茎鞘干物质输出量呈显著正相关。

3 讨论

3.1 耕作方式与肥药减量对田间病害和草害发生的影响

农药与肥料作为农业生产过程中重要的生产资料,在控制田间病虫害草害发生和提高作物产量方面起着重要作用。长期以来过量或不合理使用农药和肥料导致肥药利用效率不高,同时带来了土壤酸化板结、农药残留、病虫抗药性增强、环境污染与生态平衡破坏等一系列问题,严重影响了农产品产量和质量安全以及农业可持续发展^[2]。因此,采用绿色防控技术、减少肥料和农药的不合理投入对提高肥药利用效率、控制田间病虫害草害和保障农产品质量安全等显得尤为重要。王会福等通过采用控肥技术、生态控制技术与农药减量技术的“三控”施肥技术发现,选择适宜的施肥时期和施肥量以及优化群体结构等不仅能降低农药使用量和提高氮肥利用率,还能有效降低水稻生长过程中二化螟丛枯鞘率、纹枯病病情指数和稻曲病病情指数等病虫害造成的影响^[16]。郑许松等研究表明,通过减少氮肥和磷肥用量、降低基肥比例能明显降低水稻稻飞虱、稻纵卷叶螟和稻曲病发生^[17]。本研究结果发现,通过施用有机无机复混缓释肥的方式减少后期氮肥追施,水稻稻曲病的病穗率平均降低8.2%。吴天琦等研究也表明在不同时期的施氮比例下,前期基肥施氮量对稻曲病发生影响较小,而穗肥施氮量对稻曲病发生影响显著^[20]。此外,本研究发现,通过喷施S-诱抗素且减少30%的药剂用量,水稻的病粒率仍较常规药剂用量低15.6%。Liu等研究表明外源喷施S-诱抗素能激活水稻中NAC转录因子ONAC066的转录,从而提高水稻的抗病性^[21]。

表5 耕作方式与肥药减量对水稻产量和产量构成的影响
Table 5 Effects of cultivation methods and fertilizer and pesticide reduction on yield and yield components of rice

处理 Treatment		有效穗数 No. of effective panicle (N/10 ⁴ hm ⁻²)	每穗粒数 No. of grains per panicle (N)	结实率 Seed-setting rate (r%)	千粒重 1000-grain weight (m/g)	产量 Yield (m/t hm ⁻²)
T1		267.8 ± 56.9abcde	210.9 ± 22.2ab	65.7 ± 6.5d	26.9 ± 0.4abc	8.9 ± 0.5a
T2		269.0 ± 52.1abcde	193.6 ± 20.5ab	68.8 ± 3.6abcd	27.1 ± 0.5abc	9.0 ± 0.7a
T3		279.9 ± 61.3abcd	210.9 ± 38.5a	68.3 ± 2.9abcd	26.8 ± 0.5abc	8.9 ± 0.3a
T4		255.2 ± 47.6de	196.5 ± 17.5ab	72.2 ± 6.0abc	26.6 ± 0.9bc	9.5 ± 0.6a
T5		250.6 ± 36.0e	207.9 ± 21.2ab	67.7 ± 9.0abcd	26.5 ± 0.6c	9.3 ± 0.2a
T6		258.6 ± 53.8cde	201.1 ± 15.1ab	67.2 ± 8.3bcd	27.4 ± 1.0a	8.9 ± 0.3a
T7		287.9 ± 49.0a	207.0 ± 22.5ab	66.9 ± 4.1cd	26.9 ± 0.4abc	8.9 ± 0.5a
T8		283.3 ± 42.0abc	193.0 ± 19.6ab	72.0 ± 2.9abc	27.2 ± 0.3abc	9.3 ± 0.5a
T9		285.1 ± 51.0ab	207.6 ± 20.4ab	73.1 ± 3.2ab	27.3 ± 0.8ab	9.6 ± 0.5a
T10		278.2 ± 37.0abcd	198.2 ± 14.2ab	72.4 ± 3.0abc	27.4 ± 0.4a	9.7 ± 0.5a
T11		273.0 ± 49.1abcde	192.9 ± 12.8ab	68.0 ± 2.9abcd	26.6 ± 0.4bc	8.7 ± 0.3a
T12		260.3 ± 38.9bcde	185.9 ± 21.7b	73.3 ± 4.8a	27.2 ± 0.4abc	9.3 ± 0.1a
F值 F-value	耕作方式 Cultivation method (C)	7.6*	5.1	12.5*	1.3	2.3
	生长调节剂类型 Growth regulator type (G)	4.0*	0.4	5.1*	0.2	1.8
	施肥方式 Fertilization method (F)	1.6	6.1*	3.2	10.8**	1.4
	C × G	0.1	0.6	0.1	2.1	0.6
	C × F	0.1	0.1	0.1	0.0	0.5
	G × F	0.8	0.3	0.2	4.8*	0.1
C × G × F		1.2	0.0	1.0	1.1	1.4

同列不同小写字母表示不同肥药减量方式处理间差异显著 ($P < 0.05$)。*和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。
Different lowercases indicate significant difference at the 0.05 level among different fertilizer and pesticide reduction methods. * and ** mean significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表6 病虫草害发生和干物质转运与产量和产量构成因素的相关性
Table 6 The correlation between occurrence of diseases, pests, weeds, and yield and yield components

指标 Index	有效穗数 No. of effective panicle (N/10 ⁴ hm ⁻²)	每穗粒数 No. of grains per panicle (N)	结实率 Seed-setting rate (r%)	千粒重 1000-grain weight (m/g)	产量 Yield (m/t hm ⁻²)
莎草科杂草株数 NSW	-0.374	0.176	-0.227	-0.144	-0.673*
阔叶杂草株数 NBW	-0.282	0.077	-0.489	-0.341	-0.648*
禾本科杂草株数 NGW	-0.266	-0.042	-0.201	-0.409	-0.453
莎草科杂草鲜重 FWSW	-0.309	0.260	-0.401	-0.267	-0.743**
阔叶杂草鲜重 FWBW	-0.200	0.167	-0.620*	-0.327	-0.647*
禾本科杂草鲜重 FWGW	-0.218	0.041	-0.306	-0.422	-0.505*
稻曲病病穗率 DPFS	-0.182	0.270	-0.413	0.011	-0.083
稻曲病病粒率 DGFS	-0.137	-0.431	0.007	0.201	-0.536*
叶干物质输出量 DMEAL	-0.004	0.182	0.477	0.199	0.546*
叶干物质输出率 DMERL	-0.235	0.242	0.210	0.095	0.308
叶干物质转化率 DMTRL	-0.028	0.151	0.385	0.137	0.409
茎鞘干物质输出量 DMEAS	0.072	-0.460	0.764**	0.233	0.564*
茎鞘干物质输出率 DMERS	-0.165	-0.333	0.427	-0.137	0.237
茎鞘干物质转化率 DMTRS	-0.070	-0.522	0.678*	0.021	0.355

*和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。
NSW, number of sedge weed; NBW, number of broadleaf weed; NGW, number of Gramineae weed; FWSW, fresh weight of sedge weed; FWBW, fresh weight of broadleaf weed; FWGW, fresh weight of Gramineae weed; DPFS, diseased panicle rate of rice false smut; DGFS, diseased grain rate of rice false smut; DMEAL, dry matter exportation amount of leaf; DMERL, dry matter exportation rate of leaf; DMTRL, dry matter transformation rate of leaf; DMEAS, dry matter exportation amount of stem-sheath; DMERS, dry matter exportation rate of stem-sheath; DMTRS, dry matter transformation rate of stem-sheath; * and ** mean significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

农田杂草作为影响作物产量和品质的重要因素受到诸多人工措施的调控;其中,土壤耕作方式和水肥管理等是除施用除草剂外最基本的人工干扰措施^[22-23]。深耕可以改善土壤理化性质、促进水稻根系生长,减少田间杂草发生^[24]。本研究也表明,深耕处理下稻田杂草发生情况显著低于浅旋处理。这可能是由于深耕耕作将上层土壤中的种子带到下层土壤中,导致一些杂草种子发生腐烂和损害,进而降低土壤种子库密度^[25]。S-诱抗素作为一种多功能植物激素,在调控植物根系生长发育、促进种子发芽和幼苗生长等方面具有重要作用^[26-27]。本研究结果表明,喷施S-诱抗素后,田间杂草生长明显较未喷

施植物生长调节剂的处理好,且对杂草鲜重的影响高于对杂草株数的影响,说明喷施S-诱抗素不仅有利于杂草种子发芽,更有助于其生长发育。此外,杂草发生也受到肥料施用的影响。在本试验的施肥方式下,有机无机复混缓释肥处理的杂草生长明显较传统化肥施用处理好。潘俊峰等^[28]和董春华等^[29]研究也表明,通过有机肥与无机肥均衡配施,稻田杂草总生物量较单施有机肥或无机肥高,说明养分均衡施肥能提高杂草的生物量。较高的土壤有机质含量也能显著影响杂草群落;且在施肥条件下,土壤有机质含量越高,杂草生物多样性越高^[30]。施用S-诱抗素和缓释肥在分蘖期促进了田间杂草和水稻的生

长,但由于分蘖期杂草生长量有限且水稻处于快速分蘖阶段,因此杂草对水稻植株影响较小;同时,由于试验中对杂草种类和鲜重进行调查导致田间杂草数量减少,为了避免剩余杂草对田间水稻生长不均衡影响,试验中也对各小区剩余杂草进行了人工拔除;此外,由于水稻生长后期田间杂草基本未再发生,因此施用S-诱抗素和缓释肥处理的杂草数量增加并未对该处理水稻植株后期生长产生较大影响。综上表明,在稻田施用有机肥或植物生长调节剂时,可通过深耕耕作的方式科学防控杂草,以减少除草剂的使用。

3.2 耕作方式与肥药减量对水稻干物质积累和产量的影响

不同的病虫害草害防治与施肥方式等田间管理措施能显著影响水稻产量,而水稻产量是植株各器官干物质积累与转运的结果。合理使用稻田除草剂则能起到了稳产、增收的作用^[12,31]。朱文达等研究表明,随着稻田杂草千金子的密度增加,水稻株高显著降低,干物重也随之降低,进而导致水稻有效穗数、穗长、实粒数和千粒重等产量性状显著降低^[32]。Dhaliwal等研究表明,深耕能显著促进水稻根系生长,进而促进地上部发育,从而增加地上部干物质积累量^[33]。本研究结果表明,耕作方式能显著影响成熟期地上部各器官干物质质量与齐穗至成熟阶段叶片的输出和转化;其中,深耕耕作处理较浅旋处理显著提高成熟期各器官干物质质量以及植株的有效穗数和结实率。深耕耕作处理下的水稻平均产量较浅旋耕作也有所增加,但未达显著水平;而深耕耕作处理显著提高了成熟期穗干物质质量,这可能是由于成熟期穗干物质质量样本量较少,以及穗干物质质量包含枝梗、秕粒和实粒等部分重量,而产量仅为水稻实粒重量等原因导致二者间有一定差异。此外,由于深耕耕作能显著减少杂草发生,而产量与田间杂草发生也呈显著或极显著负相关,表明在减少除草剂用量时,通过深耕耕作的方式仍能进一步减少杂草发生,且有利于田间水稻生长,进而提高水稻有效穗数和结实率。

生长调节剂是人工合成或提取的具有调节植物生长发育作用的激素类或生物化学制剂。S-诱抗素作为植物五大激素之一,在调节植物根系生长,提高作物逆境能力与农作物品质和产量等方面具有重要作用^[34]。苏正川等研究表明,在杀菌剂中添加S-诱抗素能显著提高防治水稻稻瘟病的效果,从而提高水稻产量^[35]。赵黎明等研究表明,叶面喷施植物生长调节剂

ND能显著提高抽穗至乳熟阶段水稻茎鞘的干物质输出和转运,进而提高水稻产量^[36]。在本研究中,喷施植物激活蛋白和S-诱抗素后,齐穗期地上部干物质质量积累显著增高,进而提高有效穗数形成。喷施S-诱抗素后,抽穗至成熟阶段水稻叶片和茎鞘的干物质输出也显著提高,稻曲病发生显著降低,从而有效提高水稻结实率。

沙之敏等研究发现,有机与无机配施能促进花后同化产物向籽粒输入,提高水稻产量^[37]。Yang等通过施用有机无机复混缓释尿素发现,水稻植株的干物质积累量和产量均显著高于常规尿素处理^[38]。本研究也表明,施用有机无机复混缓释肥处理的水稻植株在齐穗至成熟阶段,叶片和茎鞘的输出和转化均显著高于传统化肥处理,因而平均千粒重也显著高于传统化肥处理。而孕穗期追施氮肥有利于提高每穗粒数,这与Zhou等的研究结果^[39]一致。此外,魏海燕等研究表明,针对不同穗型和产量特性的水稻品种,在基施缓控释肥的同时配合后期追施速效肥料,更有利于保证大穗型水稻植株维持一定数量的叶面积指数和氮素吸收^[40]。因此,通过施用有机无机复混缓释肥料提高肥料利用率的同时,应结合不同类型水稻品种与土壤地力等选择施用速效肥料,以满足作物不同生长阶段的养分需求,从而有利于提高作物产量。

4 结论

喷施S-诱抗素或施用有机无机复混缓释肥下,水稻植株稻曲病发生减轻,干物质输出和转化高,但有利于分蘖期田间杂草生长。通过深耕可显著降低分蘖期的田间莎草科、禾本科和阔叶类杂草,且在减少30%的除草剂用量后,杂草发生情况仍显著低于常规除草剂用量的浅旋耕作,从而有利于水稻生长,且成熟期水稻干物质质量较浅旋方式高。因此,在保证田间病虫害草害有效防控下,通过深耕耕作、S-诱抗素喷施和有机无机复混缓释肥施用等方式,可以减少常规化学药剂与肥料的施用量,从而有效提高肥药利用效率且保持水稻的稳产。本研究针对耕作与肥药减量化方式对田间病虫害草害发生、水稻干物质积累与转运及产量的影响等方面进行了分析,但试验品种单一,并未设计多年多点试验,今后将增加多点试验和水稻品种、延长试验年限,进一步开展肥药减量下病虫害草害发生与水稻群体发育的关系分析以及对肥药利用效率等影响的研究,为促进水稻肥药减施增效和绿色生产提供依据。

参考文献 [References]

- 1 庞艳梅. 气候变化对四川水稻产量的影响及农业气象灾害发生趋势研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 10-11 [Pang YM. Impact of climate change on rice yield and trend of agricultural meteorological disasters during rice growth period in Sichuan province [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016: 10-11]
- 2 程家安, 祝增荣. 中国水稻病虫害治理60年: 问题与对策[J]. 植物保护学报, 2017, 44 (6): 885-895 [Cheng JA, Zhu ZR. Development of rice pest management in the past 60 years in China: problems and strategies [J]. *J Plant Protec*, 2017, 44 (6): 885-895]
- 3 杜宇峰, 叶央芳. 除草剂苯噻草胺对水稻田土壤微生物种群的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11 (6): 747-750 [Du YF, Ye YF. Effect of herbicide mefenacet on microbial populations in paddy soil [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2005, 11 (6): 747-750]
- 4 Xue L, Liu XJ, Lu SJ, Cheng GY, Hu YC, Liu JG, Dou ZX, Cheng SK, Liu G. China's food loss and waste embodies increasing environmental impacts [J]. *Nat Food*, 2021, 2 (7): 519-528
- 5 Rademacher W. Plant growth regulators: backgrounds and uses in plant production [J]. *J Plant Growth Regul*, 2015, 34 (4): 845-872
- 6 Alazem M, He MH, Moffett P, Lin NS. Abscissic acid induces resistance against bamboo mosaic virus through argonaute 2 and 3 [J]. *Plant Physiol*, 2017, 174 (1): 339-355
- 7 Liu JL, Du HT, Ding X, Zhou YD, Xie PF, Wu JC. Mechanisms of callose deposition in rice regulated by exogenous abscissic acid and its involvement in rice resistance to *Nilaparvata lugens* Stal

- (Hemiptera: Delphacidae) [J]. *Pest Manag Sci*, 2017, **73** (12): 2559-2568
- 8 彭玉, 马均, 蒋明金, 严奉君, 孙永健, 杨志远. 缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19** (5): 1048-1057 [Peng Y, Ma J, Jiang MJ, Yan FJ, Sun YJ, Yang ZY. Effects of slow/controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2013, **19** (5): 1048-1057]
 - 9 Ke J, Xing XM, Li GH, Ding YF, Dou FG, Wang SH, Liu ZH, Tang S, Ding CQ, Chen L. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilisation, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice [J]. *Field Crops Res*, 2017, **205** (1): 147-156
 - 10 蒋伟勤, 马中涛, 胡群, 马会珍, 任高磊, 朱盈, 刘国栋, 张洪程, 魏海燕. 缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, **36** (3): 777-784 [Jiang WQ, Ma ZT, Hu Q, Ma HZ, Ren GL, Zhu Y, Liu GD, Zhang HC, Wei HY. Effects of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice growth and nitrogen utilization [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2020, **36** (3): 777-784]
 - 11 刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 黄兴成, 张雅蓉, 张萌, 张文安, 蒋太明. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25** (7): 1146-1156 [Liu YL, Li Y, Bai YJ, Huang XC, Zhang YR, Zhang M, Zhang WA, Jiang TM. Effect of long-term fertilization patterns on dry matter and phosphorus accumulation and translocation in rice [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2019, **25** (7): 1146-1156]
 - 12 张勇, 徐智, 王宇蕴, 邓亚琴, 刘美菊, 尹元萍, 郑魁, 姜义晟, 赵兵. 有机无机配施体系中有肥腐熟程度对化肥氮利用率的影响机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, **29** (6): 1051-1060 [Zhang Y, Xu Z, Wang YY, Deng YQ, Liu MJ, Yin YP, Zheng K, Lou YS, Zhao B. Effect mechanism of maturity degree of organic fertilizer on nitrogen utilization efficiency [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2021, **29** (6): 1051-1060]
 - 13 关劫兮, 陈素英, 邵立威, 张玉铭, 张喜英, 路杨, 闫宗正. 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, **27** (11): 1663-1672 [Guan JX, Chen SY, Shao LW, Zhang YM, Zhang XY, Lu Y, Yan ZZ. Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2019, **27** (11): 1663-1672]
 - 14 黄国勤. 长江经济带稻田耕作制度绿色发展探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, **28** (1): 1-7 [Huang GQ. Green development of paddy field farming systems in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2020, **28** (1): 1-7]
 - 15 易军, 符慧娟, 李星月, 朱从桦, 李其勇, 张鸿. 化学农药减量化措施对水稻病虫害发生及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, **28** (12): 1913-1923 [Yi J, Fu HJ, Li XY, Zhu CH, Li QY, Zhang H. The effects of chemical pesticide reduction on the occurrence of diseases, pests, weeds and rice yield [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2020, **28** (12): 1913-1923]
 - 16 王会福, 余山红, 钟列权, 郑许松. 肥药双减减对单季稻病虫害发生和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, **34** (12): 136-141 [Wang HF, Yu SH, Zhong LQ, Zheng XS. Reduction of fertilizer and pesticide: the effect on yield of single cropping rice and occurrence of pests or diseases [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2018, **34** (12): 136-141]
 - 17 郑许松, 田俊策, 钟列权, 王会福, 吕仲贤. 持续控肥对水稻产量、病虫害发生和土壤肥力的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, **61** (9): 1839-1842 [Zheng XS, Tian JC, Zhong LQ, Wang HF, Lv ZX. Effects of continuous fertilizer control on rice yield, occurrence of diseases and pests, and soil fertility [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2020, **61** (9): 1839-1842]
 - 18 刁春友, 朱叶芹. 农作物主要病虫害预测预报与防治[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2006: 49-129 [Diao CY, Zhu YQ. Prediction, Forecast and Control of Main Crop Diseases and Insect Pests [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2006: 49-129]
 - 19 刘琦, 胡剑锋, 周伟, 杨志平, 陈勇, 任万军. 四川盆地不同类型水稻品种机插栽培的干物质生产及产量特性分析[J]. 中国水稻科学, 2019, **33** (1): 35-46 [Liu Q, Hu JF, Zhou W, Yang ZP, Chen Y, Ren WJ. Dry matter production and yield characteristics of machine-transplanted rice varieties falling into different types in Sichuan basin [J]. *Chin J Rice Sci*, 2019, **33** (1): 35-46]
 - 20 吴天琦, 刘浪, 卞传飞, 谭景文, 石绪根, 李保同. 栽培方式与氮肥运筹对江西双季晚粳稻曲病及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, **23** (2): 159-169 [Wu TQ, Liu L, Bian CF, Tan JA, Shi XG, Li BT. Effects of cultivation patterns and nitrogen application on the rice false smut and yield of double cropping late *Japonica* rice in Jiangxi province [J]. *J Agric Sci Technol*, 2021, **23** (2): 159-169]
 - 21 Liu Q, Yan SJ, Huang WJ, Yang JY, Dong JF, Zhang SH, Zhao JL, Yang TF, Mao XX, Zhu XY, Liu B. NAC transcription factor ONAC066 positively regulates disease resistance by suppressing the ABA signaling pathway in rice [J]. *Plant Mol Biol*, 2018, **98** (4-5): 289-302
 - 22 Matloob A, Khaliq A, Tanveer A, Hussain S, Aslam F, Chauhan BS. Weed dynamics as influenced by tillage system, sowing time and weed competition duration in dry-seeded rice [J]. *Crop Prot*, 2015, **71** (5): 25-38
 - 23 Kaur S, Kaur R, Chauhan BS. Understanding crop-weed-fertilizer-water interactions and their implications for weed management in agricultural systems [J]. *Crop Prot*, 2018, **103** (1): 25-38.
 - 24 王秋菊, 高中超, 张劲松, 常本超, 姜辉, 孙兵, 郭中原, 贾会彬, 焦峰, 刘峰. 黑土稻田连续深耕改善土壤理化性质提高水稻产量大田试验[J]. 农业工程学报, 2017, **33** (9): 126-132 [Wang QJ, Gao ZC, Zhang JS, Chang BC, Jiang H, Sun B, Guo ZY, Jia HB, Jiao F, Liu F. Black-soil paddy field experiment on improving soil physical and chemical properties and increasing rice yield by continuous deep ploughing [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2017, **33** (9): 126-132]
 - 25 严佳瑜, 张亚萍, 宋坤, 田志慧, 陆俊尧, 王依明, 吴雪源, 达良俊. 不同耕作深度和轮作模式下上海稻田杂草土壤种子库特征[J]. 上海农业学报, 2021, **37** (1): 82-86 [Yan JY, Zhang YP, Song K, Tian ZH, Lu JY, Wang YM, Wu XY, Da LJ. Characteristics of weed soil seedbank under different tillage depths and rotation systems in Shanghai rice paddy fields [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2021, **37** (1): 82-86]
 - 26 朱晓琛, 张汉马, 南文斌. 脱落酸调控植物根系生长发育的研究进展[J]. 植物生理学报, 2017, **53** (7): 1123-1130 [Zhu XC, Zhang HM, Nan WB. Research progress on regulation of ABA in plant root development [J]. *Plant Physiol J*, 2017, **53** (7): 1123-1130]
 - 27 Rymen B, Kawamura A, Schaefer S, Breuer C, Sugimoto K. ABA suppresses root hair growth via OBP4 transcriptional regulator repression of the RSL2 promoter [J]. *Plant Physiol*, 2017, **173** (3): 1750-1762
 - 28 潘俊峰, 万开元, 章力干, 王道中, 陶勇, 程传鹏, 谢娟, 陈防. 长期有机-无机肥配施对农田杂草土壤种子库的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19** (2): 480-488 [Pan JF, Wan KY, Zhang LG, Wang DZ, Tao Y, Cheng CP, Xie J, Chen F. Effects of long-term combined application of organic manure and chemical fertilizers on farmland weed soil seedbank [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2013, **19** (2): 480-488]
 - 29 董春华, 曾希柏, 刘强, 高菊生, 文石林. 有机无机肥配施对晚稻产量和杂草群落的影响[J]. 核农学报, 2016, **30** (9): 1815-1823 [Dong CH,

- Zeng XB, Liu Q, Gao JS, Wen SL. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on weed community and late rice yield [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2016, **30** (9): 1815-1823]
- 30 潘俊峰, 万开元, 李祖章, 陶勇, 刘益仁, 刘毅, 李志国, 张过师, 陈防. 施肥模式对晚稻田杂草群落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21** (1): 200-210 [Pan JF, Wan KY, Li ZZ, Tao Y, Liu YR, Liu Y, Li ZG, Zhang GS, Chen F. Effect of fertilization patterns on weed community in late rice fields [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21** (1): 200-210]
- 31 Dossou-Yovo ER, Saito K. Impact of management practices on weed infestation, water productivity, rice yield and grain quality in irrigated systems in Cote d'Ivoire [J]. *Field Crops Res*, 2021, **270**: 108209
- 32 朱文达, 周普国, 何燕红, 杨峻, 林荣华, 齐文全, 李林, 欧阳灿彬. 千金子对水稻生长和产量性状的影响及其防治经济阈值[J]. 南方农业学报, 2018, **49** (5): 863-869 [Zhu WD, Zhou PG, He YH, Yang J, Lin RH, Qi WQ, Li L, Ouyang CB. Influence of *Leptochloa chinensis* (L.) Nees. on growth and yield properties of rice and its economic threshold of control [J]. *J South Agric*, 2018, **49** (5): 863-869]
- 33 Dhaliwal J, Kahlon MS, Kukal SS. Deep tillage and irrigation impacts on crop performance of direct seeded rice-wheat cropping system in north-west India [J]. *Paddy Water Environ*, 2021, **19** (1): 113-126
- 34 黎家, 李传友. 新中国成立70年来植物激素研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2019, **49** (10): 1227-1281 [Li J, Li CY. Seventy-year major research progress in plant hormones by Chinese scholars [J]. *Sci Sin Vit*, 2019, **49** (10): 1227-1281]
- 35 苏正川, 谢兴伟, 白伟, 刘文涛, 熊仁科, 吴红波, 司乃国. S-诱抗素对水稻稻瘟病防治和产量的影响[J]. 农药, 2020, **59** (8): 601-603 [Su ZC, Xie XW, Bai W, Liu WT, Xiong RK, Wu HB, Si NG. Effects of S-abscisic acid on control of rice blast and yield to rice [J]. *Agrochemicals*, 2020, **59** (8): 601-603]
- 36 赵黎明, 李明, 冯乃杰, 杜吉到, 郑殿峰. 植物生长调节剂对寒地水稻产量和品质的影响[J]. 中国农学通报. 2015, **31** (3): 43-48 [Zhao LM, Li M, Feng NJ, Du JD, Zheng DF. Effect of plant growth regulators on yield and quality of rice in the cold region [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, **31** (3): 43-48]
- 37 沙之敏, 陈侠桦, 赵峥, 史超超, 袁永坤, 曹林奎. 施肥方式对水稻‘花优14’干物质积累、产量及肥料利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26** (6): 815-823 [Sha ZM, Chen XH, Zhao Z, Shi CC, Yuan YK, Cao LK. Effect of fertilizer management on dry matter accumulation, yield and fertilizer use efficiency of rice cultivar ‘Huayou-14’ [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2018, **26** (6): 815-823]
- 38 Yang Y, Liu BM, Ni XY, Tao LZ, Yu LX, Yang Y, Feng MX, Zhong WJ, Wu YJ. Rice productivity and profitability with slow-release urea containing organic-inorganic matrix materials [J]. *Pedosphere*, 2021, **31** (4): 511-520
- 39 Zhou W, Lv TF, Yang ZP, Wang T, Fu Y, Chen Y, Hu BH, Ren WJ. Morphophysiological mechanism of rice yield increase in response to optimized nitrogen management [J]. *Sci Rep*, 2017, **7**: 17226
- 40 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 郭保卫, 胡雅杰, 崔培媛. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2017, **43** (5): 730-740 [Wei HY, Li HL, Cheng JQ, Zhang HC, Dai QG, Huo ZY, Xu K, Guo BW, Hu YJ, Cui PY. Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle [J]. *Acta Agron Sin*, 2017, **43** (5): 730-740]