中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

化学农药减量化措施对水稻病虫草害发生及产量的影响

易军，符慧娟，李星月，朱从桦，李其勇，张鸿

引用本文:
易军, 符慧娟, 李星月, 等. 化学农药减量化措施对水稻病虫草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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200297

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

千金子与异型莎草对直播水稻产量的影响及其生态经济阈值研究

Effects and eco–economic thresholds of *Leptochloa chinensis* and *Cyperus difformis* on the yield of direct–seeding rice

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 328–336 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190755

春小麦秸秆还田对后茬玉米干物质积累及产量形成的调控效应

Responses of dry matter accumulation and yield in a following maize crop to spring wheat straw returning

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1210–1218 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200164

水稻秸秆–薄膜连续叠加覆盖对三叶鬼针草的控制效果

Effect of continuous overlay mulching of rice straw–plastic film on control of invasive plant *Bidens pilosa* L.

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(11): 1682–1691 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200101

有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响

Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat–rice system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 405–412 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190617

生态补偿标准对农户生产行为的影响——以云南省红河县哈尼稻作梯田为例

Impacts of eco–compensation on the farmers' production behavior of Hani Rice Terraces in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(9): 1339–1349 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200239

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 12 月 第 28 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2020, 28(12): 1913−1923

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200297

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草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 H J, LI X Y, ZHU C H, LI Q Y, ZHANG H. The effects of chemical pesticide reduction on the occurrence of diseases, pests, weeds and rice yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1913−1923

化学农药减量化措施对水稻病虫草害发生及产量的影响*

易 军[1], 符慧娟[1], 李星月[1], 朱从桦[3], 李其勇[1], 张 鸿[2**]

(1. 四川省农业科学院植物保护研究所/农业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: 为研究化学农药减量下不同栽培管理措施对水稻田间病虫草害发生及水稻干物质生产及产量的影响, 进一步明确减少化学农药施用与水稻产量的关系, 采用裂区试验设计, 主区因素为 2 种杂草防治方式[浅旋耕作+常规除草剂用量(浅耕)、深耕耕作+减少 30%除草剂用量(深耕)], 副区因素为 2 种病虫防治方式[常规病虫害药剂用量(常规防治)、植物激活蛋白+减少 30%病虫害药剂用量(喷施激活蛋白)], 副副区因素为秧苗处理方式(未带药移栽、带药移栽), 分析测定了田间病虫草害发生、水稻干物质积累与转运、产量及构成因素等指标。结果表明: 深耕下, 分蘖期和灌浆期田间杂草株数和鲜重较浅耕显著降低, 螟虫引起的植株白穗率也明显较浅耕低。浅耕方式下水稻植株带药移栽或喷施激活蛋白后叶瘟病发生情况明显降低。在水稻干物质生产方面, 病虫防治方式和杂草防治方式显著或极显著影响茎鞘干物质积累, 且显著或极显著影响茎鞘干物质输出量、输出率和转化率; 杂草方式、秧苗处理和病虫防治 3 种方式的互作显著影响茎鞘干物质输出率和转化率; 喷施激活蛋白后, 齐穗期水稻植株的茎鞘干物质量增加 4.0%~19.4%; 深耕下, 成熟期水稻植株的茎鞘干物质量平均增加 7.1%, 但在齐穗至成熟阶段的茎鞘干物质输出和转化相对较小。相关性分析表明水稻产量与分蘖期和灌浆期杂草发生情况和叶瘟发生呈显著或极显著负相关。此外, 在深耕、带药移栽或喷施植物激活蛋白方式下, 减少 30%的病虫草害药剂用量后水稻产量没有显著变化。表明通过深耕、带药移栽或喷施植物激活蛋白等病虫草害防治方式, 能有效减少水稻的化学农药用量, 实现水稻稳产增效。

关键词: 水稻; 病虫草害; 农药减量; 深耕; 植物激活蛋白; 产量

中图分类号: S471 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

The effects of chemical pesticide reduction on the occurrence of diseases, pests, weeds and rice yield*

YI Jun[1], FU Huijuan[1], LI Xingyue[1], ZHU Conghua[3], LI Qiyong[1], ZHANG Hong[2**]

(1. Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 610066, China; 2. Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 3. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

* 四川省财政创新能力提升工程专项(2016GYSH-013)、公益性行业(农业)科研专项经费(201503127)、四川省农业科学院前沿学科研究基金(2019QYXK027)和成都市科技计划项目(019-GH02-00083-HZ)资助
** 通信作者: 张鸿, 主要从事作物栽培与绿色生产技术研究。E-mail: zhh503@163.com
易军, 主要从事水稻栽培生理研究。E-mail: donnyj123@163.com
收稿日期: 2020-04-20 接受日期: 2020-08-13

* This research was supported by the Special Fund for Financial Innovation Ability Promotion of Sichuan Province (2016GYSH-013), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503127), the Research Fund for Frontier Subjects of Sichuan Academy of Agricultural Sciences (2019QYXK027) and the Science and Technology Program of Chengdu (019-GH02-00083-HZ).
** Corresponding author, E-mail: zhh503@163.com
Received Apr. 20, 2020; accepted Aug. 13, 2020

Abstract: A split-field test was conducted to explore how chemical pesticide reduction affects rice yield. Two weed control methods (shallow rotary tillage with conventional herbicide amounts and deep tillage with 30% less herbicide; main factor), two disease and pest control methods (conventional insecticide and fungicide amounts and plant activator protein application with 30% less insecticide and fungicide; sub-plot factor), and two seedling treatment methods (transplanting with and without pesticides; split-split plot factor) were used to investigate rice diseases, pests, weeds, and dry matter production. The results showed that deep tillage significantly decreased the weed numbers and weight compared to the shallow rotary tillage, and the white panicle rate (caused by the borer) was also significantly lowered. Rice plant leaf blast was significantly reduced by using conventional shallow rotary tillage after transplantation with pesticides or the spraying of plant activator protein. Both the weed control methods and the disease and pest control methods had significant effects on the stem sheath dry matter accumulation, and stem sheath dry matter transformation. The interactions between the weed control methods, disease and pest control methods, and seedling treatment methods significantly affected the stem sheath exportation and dry matter transformation. After the plant activator protein application, the stem sheath dry matter increased by 4.0% to 19.4% at the full heading stage. When deep tillage was used, the stem sheath dry matter increased by an average of 7.1%. However, the stem sheath exportation and dry matter transformation decreased from the full heading to maturity stages. Correlation analysis showed that the rice yield was significantly negatively correlated with weeds (tillering and grain-filling stages) and leaf blast (tillering stage). No effect on the rice yield was observed when strategies such as deep tillage, transplantation with pesticides, or the spraying of plant activator protein were employed with 30% less pesticide. These results suggest that the chemical pesticide amount could be reduced during planting by using control methods such as deep tillage, transplantation with pesticides, or the spraying of plant activator protein, and that the rice yield would remain stable.

Keywords: Rice; Disease, pest and weed; Pesticide reduction; Deep tillage; Plant activator protein; Yield

水稻(*Oryza sativa*)是四川盆地的主要粮食作物之一，然而四川盆地地区高温高湿，导致水稻生长季节病虫草害常年发生[1-2]。据国家统计年鉴显示，2010—2018 年四川省农作物病虫害防治农药年均使用量为 5.86 万 t，比 2000—2009 年增长 1.7%。过量的农药施用和不合理的防治措施导致药剂利用效率不高，同时还带来了土壤板结、酸化、农药残留毒性、病虫抗(耐)药性上升、次要害虫大发生、环境污染和生态平衡破坏等一系列问题，从而严重影响水稻的产量和品质安全以及农业生态环境安全[3-4]。病虫草害是影响水稻产量的重要因素之一。因此在稳产增产的前提下，发展化肥农药替代技术，促进传统化学防治向现代绿色防控的转变，减少生产中化学农药的投入，实现水稻产量与品质安全和农业生态环境保护相协调的可持续发展具有重要意义。

植物激活蛋白作为新型的生物农药和常用的植物免疫诱抗剂之一，为控制农作物病虫害提供了新的思路和途径[5-6]。植物激活蛋白通过诱导植物信号传导来激活植物自身的防御系统和生长系统，显著提高植物体内与抗病相关的酶活性，从而降低植物病虫害发生[7-9]。带药移栽也是较为常用的水稻生长前期病虫害预防措施之一，廖永林等[10]研究发现带药移栽后能有效控制水稻分蘖期白背飞虱(*Sogatella furcifera*)和褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)的发生，且持效期达 33 d。此外，耕作方式对田间杂草分布存在显著影响，Chauhan 等[11]发现耕作深度越深，杂草幼苗萌发的数量越少。深耕耕作方式还能提高农田土壤的酶活性和养分有效性[12-14]。水稻病虫草害发生和产量受到田间耕作方式、化学农药类型和用量等因素的影响，而同时在结合耕作方式、植物激活蛋白施用和带药移栽等病虫草害防治方式下，探究化学农药用量对水稻产量形成的影响鲜见报道，限制了不同防治措施配套使用的推广。因此，本文通过研究深耕、激活蛋白施用和带药移栽与不同病虫草药剂用量配合处理的方式对田间病虫草害发生及水稻干物质积累和分配以及产量和产量构成的影响，以期为稻田绿色防治方式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 2019 年 4—10 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*)。试验地处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(白背飞虱和褐飞虱)、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。

1.2 试验设计

供试水稻品种为‘天优湘 99’，三系杂交籼稻，

全生育期 149 d 左右。

试验采用三因素裂区设计, 主区为杂草防治方式[W1, 浅旋+常规除草剂用量(浅耕); W2, 深耕+70%常规除草剂用量(深耕)], 副区为病虫防治方式(D1, 常规病虫药剂用药量; D2, 70%病虫药剂用药量+植物激活蛋白喷施), 副副区为秧苗处理方式(S1, 未带药移栽; S2, 带药移栽), 共计 8 个处理(表 1), 每处理重复 3 次, 共计 24 个小区, 小区面积为 81 m^2。小区之间用 PVC 隔板隔开防止串水串肥。各小区独立排灌。

4 月 18 日播种, 水育苗。5 月 22 日按试验处理进行耕地和除草剂喷施, 浅旋(12~15 cm)或深耕(25~27 cm), 常规除草剂用量为 787.5 mL·hm^{-2} 二甲-氯氟吡乳油剂(含 70%二甲四氯异辛酯+15%氯氟吡氧乙酸异辛酯)和 630 g·hm^{-2} 25%氰氟草酯水乳剂。5 月 23 日移栽, 起苗前对带药移栽秧苗苗床喷施 600 g·hm^{-2} 三环唑(75%可湿性粉剂)和 225 g·hm^{-2} 康宽(20%氯虫苯甲酰胺)。移栽时秧苗叶龄均为 4 叶一心, 栽插规格为 30 cm×20 cm, 每穴两苗。移栽 7 d 后, 各小区均施入 N-P_2O_5-K_2O 为 25-5-10 的缓释肥 600 kg·hm^{-2}, 并按试验处理喷施 15 g·hm^{-2} 植物激活蛋白(大丽轮枝菌激活蛋白 VdAL)。7 月 25 日喷施福戈、爱苗和井冈霉素等防病虫药剂, 常规防病虫药剂用量为 80.0 g·hm^{-2} 福戈水分散粒剂(含 20%氯虫苯甲酰胺+20%噻虫嗪)、187.5 mL·hm^{-2} 爱苗乳油剂(含 15%苯醚甲环唑+15%丙环唑)和 1 312.5 g·hm^{-2} 井岗霉素水剂(含 4%井冈霉素 A)。7 月 30 日, 各小区均追施氯化钾(含 60%的 K_2O)112.5 kg·hm^{-2} 和过磷酸钙(含 12.5%的 P_2O_5)37.5 kg·hm^{-2}。9 月 21 日收获。

表 1　不同处理病虫草害防治栽培管理方式

Table 1　Control methods of disease, pest and weed in rice field of different treatments

处理 Treatment	杂草防治方式 Weed control (W)	病虫害防治方式 Disease and pest control (D)	秧苗处理 Seedling treatment (S)
T1(W1D1S1)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (W1)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (D1)	未带药移栽 Transplanting without pesticides (S1)
T2(W1D1S2)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (W1)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (D1)	带药移栽 Transplanting with pesticides (S2)
T3(W1D2S1)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (W1)	70%常规防治病虫药剂用量+激活蛋白 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (D2)	未带药移栽 Transplanting without pesticides (S1)
T4(W1D2S2)	浅旋+常规除草剂用量 Shallow rotary tillage with conventional amount of herbicides (W1)	70%常规防治病虫药剂用量+激活蛋白 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (D2)	带药移栽 Transplanting with pesticides (S2)
T5(W2D1S1)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (W2)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (D1)	未带药移栽 Transplanting without pesticides (S1)
T6(W2D1S2)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (W2)	常规防治病虫药剂用量 Conventional amounts of insecticides and fungicides (D1)	带药移栽 Transplanting with pesticides (S2)
T7(W2D2S1)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (W2)	70%常规防治病虫药剂用量+激活蛋白 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (D2)	未带药移栽 Transplanting without pesticides (S1)
T8(W2D2S2)	深耕+70%常规除草剂用量 Deep tillage with 30% reduction of herbicides (W2)	70%常规防治病虫药剂用量+激活蛋白 Plant activator protein application with 30% reduction of insecticides and fungicides (D2)	带药移栽 Transplanting with pesticides (S2)

1.3　测定项目与方法

1.3.1　杂草生长情况调查

在水稻分蘖盛期和灌浆期, 参照刁春友等[15]方法, 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。

1.3.2　病虫害发生调查

参照刁春友等[15]方法, 在各调查区内 5 点取样, 每点调查相邻的 10 穴水稻植株, 按试验进度分别在水稻分蘖末期和黄熟期调查稻瘟病(叶瘟和穗颈瘟)

的发病率和病情指数; 在黄熟期调查稻曲病的病穗率和病粒率, 以及螟虫危害定型后植株的白穗数。

1.3.3 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, 于 105 ℃下杀青 30 min, 再经 80 ℃烘干至恒重, 称重后计算各处理植株的干物质积累与分配情况。

1.3.4 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 m^2 进行人工脱粒, 按标准含水量 13.5%计算单位面积产量。

1.3.5 数据计算

叶瘟或穗颈瘟发病率(%)=[发病株(叶、穗)数/调查总株(叶、穗)数]×100 (1)

叶瘟或穗颈瘟病情指数=[(各级发病数×各级代表值)/(调查总株数×5)]×100 (2)

稻曲病病穗率(%)=(病穗数总穗数/调查总穗数)×100 (3)

稻曲病病粒率(%)=(病粒数总粒数/调查总粒数)×100 (4)

整白穗率(%)=(整穗白穗数/调查总穗数)×100 (5)

部分白穗率(%)=(部分穗白穗数/调查总穗数)×100 (6)

叶片(茎鞘)干物质输出量($t\cdot hm^{-2}$)=齐穗期叶片(茎鞘)干重–成熟期叶片(茎鞘)干重 (7)

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 (8)

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 (9)

1.4 统计分析

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 防治方式对杂草发生的影响

从表 2 可以看出, 在分蘖期, 深耕和除草剂减量处理下, 田间杂草株数和鲜重较浅耕和常规用量处理显著减少, 莎草科、阔叶和禾本科杂草平均株数分别较浅耕和常规用量处理低 69.6%、67.3%和 96.4%; 在杂草鲜重方面, 平均鲜重较浅耕和常规用量处理分别低 85.2%、86.0%和 98.4%; 深耕和除草剂减量处理下田间基本未见禾本科杂草。在灌浆期, 深耕和除草剂减量处理下, 田间的莎草科和阔叶杂草平均株数分别较浅耕和常规用量处理降低 58.8%和 65.6%; 杂草平均鲜重较浅耕和常规用量处理分别低 74.6%和 96.4%; 另外, 各处理田间均鲜见禾本科杂草。说明深耕下除草剂减量处理可减少分蘖期和灌浆期水稻田间的莎草科、阔叶和禾本科杂草发生, 从而有利于水稻生长发育。

2.2 防治方式对病虫害发生的影响

如图 1 所示, 在不同病虫害防治处理下, 水稻叶瘟的发病率和病情指数以及螟虫造成的白穗率差异显著。在深耕方式下, 水稻植株的叶瘟发病率和病情指数较浅旋耕方式分别降低 11.7%~45.1%和 18.9%~43.7%; 带药移栽处理下, 水稻植株的叶瘟发病率和病情指数也明显较低, 分别较未带药移栽处理低 18.2%~30.2%和 13.9%~33.3%。T1 处理的叶瘟发病率和病情指数最高, 较最低的 T6 处理分别高 1.2 倍和 1.1 倍。穗颈瘟发病情况以 T8 处理发病最轻。在稻曲病造成的病穗率和病粒率方面, 常规病虫药剂用量处理较喷施激活蛋白和减药 30%处理分别平均减少 57.1%和 79.4%。其中, T4 处理的稻曲病病穗率和病粒率最高, 分别达 9.3%和 0.2%。在螟虫造成的白穗率方面, 深耕处理下水稻植株的平均整白穗率较浅旋耕处理低 72.3%, 而植株的平均部分白穗率较浅旋耕处理高 1.9 倍; 其中 T4 处理的整白穗率最高, 较整白穗率最低的 T7 处理高 35.0 倍; 此外, T5 处理的部分白穗率最高。综上表明, 深耕和带药移栽均有利于减少水稻叶瘟的发生, 同时深耕的耕作方式还有利于降低由螟虫造成的植株白穗率; 而在孕穗期减施 30%的药剂用量不利于稻曲病的防治。

2.3 防治方式对水稻干物质积累与转运的影响

在水稻齐穗期, 病虫防治显著影响茎鞘干物质量(表 3)。喷施激活蛋白和病虫药剂减量 30%处理下, 水稻植株的茎鞘干物质量较常规药剂用量处理高 4.0%~19.4%。其中, T3 处理的茎鞘干物质量最高, 较最低的 T6 处理显著高 35.3%。在成熟期, 杂草防治方式显著影响茎鞘的干物质量。深耕和减少 30%除草剂用量下, 水稻植株的茎鞘干物质量较常规除草剂用量处理平均高 7.1%。其中, T6 处理的茎鞘干物质量最高, 较最低的 T2 处理显著高 20.4%。而在各防治方式处理下, 齐穗期和成熟期水稻叶和穗的干物质量间均没有显著差异。

表 2　不同防治方式对田间杂草株数和鲜重的影响

Table 2　Effects of different control methods on plant number and fresh weight of weeds in rice field

时期 Stage	处理 Treatment	杂草株数 Weed number (plants·m^{-2})			杂草鲜重 Weed fresh weight (g·m^{-2})		
		莎草科 Cyperaceae	阔叶 Broadleaf	禾本科 Gramineae	莎草科 Cyperaceae	阔叶 Broadleaf	禾本科 Gramineae
分蘖期 Tillering stage	T1	38.4±8.5a	66.6±11.5a	14.9±3.8ab	51.5±11.2a	31.6±4.6ab	14.5±1.7a
	T2	19.6±3.7ab	64.4±12.5a	18.1±3.9a	25.3±4.1bc	47.1±7.8a	12.5±3.5ab
	T3	13.0±3.8b	46.4±11.0ab	8.0±2.0bc	16.2±3.5bc	27.5±4.1abc	6.1±1.4bc
	T4	12.6±2.1b	39.9±9.5ab	8.7±2.2abc	28.9±5.5ab	19.2±3.2bcd	4.9±1.1bc
	T5	5.8±1.8b	12.5±3.5b	0.0±0.0c	2.3±1.6c	2.2±0.3d	0.0±0.0c
	T6	5.2±1.2b	10.3±1.9b	0.0±0.0c	3.2±2.6c	2.1±0.3d	0.0±0.0c
	T7	6.4±1.0b	24.8±3.9b	0.9±0.1c	6.2±1.3bc	6.1±2.0cd	0.4±0.1c
	T8	8.0±2.0b	23.5±2.6b	0.9±0.2c	6.4±1.7bc	7.1±0.1cd	0.2±0.0c
F 值 *F* value	杂草防治 Weed control (W)	15.4*	16.7*	25.3**	22.5**	22.8**	23.3**
	病虫防治 Disease and pest control (D)	3.8	0.3	2.3	1.2	1.0	3.9
	秧苗处理 Seedling treatment (S)	1.5	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2
	W×D	5.8*	3.8	3.6	3.1	3.3	4.6*
	W×S	1.9	0.0	0.2	0.4	0.1	0.1
	D×S	1.9	0.0	0.1	3.0	1.0	0.0
	W×D×S	1.2	0.0	0.1	3.3	1.2	0.0
灌浆期 Grain-filling stage	T1	10.2±2.1ab	11.1±1.8a	0.0	308.3±45.5abc	149.5±13.4 a	0.0
	T2	12.9±0.8a	10.2±1.7ab	0.0	569.2±73.0ab	110.8±10.1 a	0.0
	T3	7.6±1.6ab	11.1±1.9a	0.0	635.3±85.8a	79.9±16.8 b	0.0
	T4	7.1±1.8ab	8.9±1.8ab	0.0	421.7±58.8abc	67.2±7.2 b	0.0
	T5	3.1±1.5b	1.3±0.3b	0.0	99.2±21.6c	0.6±0.0 c	0.0
	T6	2.7±0.3b	2.7±0.3b	0.0	64.3±15.0c	4.2±0.7 c	0.0
	T7	5.3±1.0ab	4.0±1.0ab	0.0	149.7±27.1abc	1.8±0.2 c	0.0
	T8	4.4±1.3ab	6.2±0.8ab	0.0	177.5±18.1abc	8.2±1.5 c	0.0
F 值 *F* value	杂草防治 Weed control (W)	5.3*	4.9*	—	10.8**	6.1*	—
	病虫防治 Disease and pest control (D)	0.2	0.2	—	0.6	0.5	—
	秧苗处理 Seedling treatment (S)	0.0	0.0	—	0.0	0.1	—
	W×D	1.7	0.4	—	0.0	0.6	—
	W×S	0.1	0.3	—	0.0	0.1	—
	D×S	0.1	0.0	—	0.9	0.0	—
	W×D×S	0.1	0.0	—	1.5	0.0	—

T1-T8 处理描述见表 1。同列不同小写字母表示同一生育期不同防治方式处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。The meanings of T1-T8 are shown in the table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ level among different control methods at the same growth stage. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

由表 4 可知，病虫防治与秧苗处理方式互作显著影响叶片干物质输出和转化；在常规病虫害防治情况下，未带药移栽处理植株叶片的干物质输出量、输出率和转化率明显较高，平均高 33.6%、15.9%和 30.7%；而在喷施激活蛋白和减少 30%病虫药剂用量的防治方法中，带药移栽处理植株叶片的干物质输出量、输出率和转化率较未带药移栽处理分别高 20.9%、17.1%和 30.8%。杂草防治方式和病虫防治方式均显著或极显著影响茎鞘干物质的输出量、输出率和转化率；杂草防治、病虫防治与秧苗处理

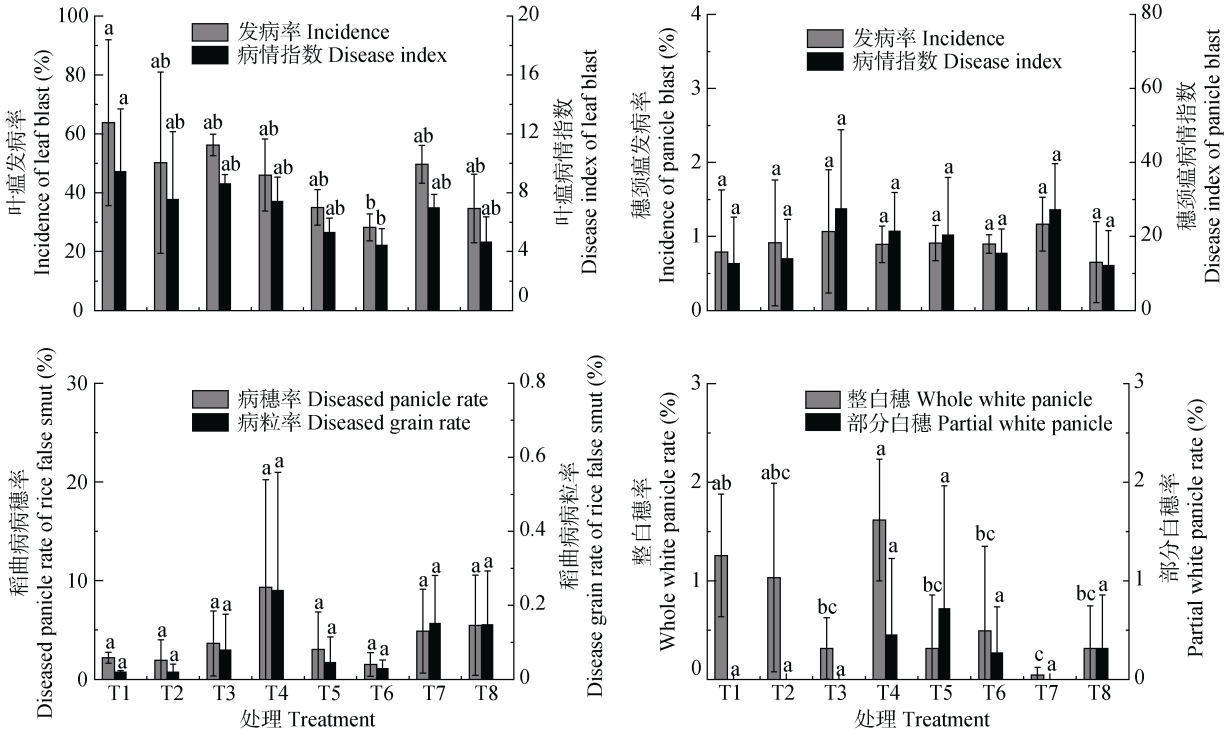

图 1 不同防治方式下稻田病虫害发生情况

Fig. 1 Occurrence of pest and disease in the rice field under different control methods

T1-T8 处理描述见表 1。不同小写字母表示在同一病虫害指标下不同防治方式处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。The meanings of T1-T8 are shown in the table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ level among different control methods for the same index of disease or pest.

表 3 不同防治方式对水稻干物质积累的影响

Table 3 Effects of different control methods on dry matter accumulation of rice $t\cdot hm^{-2}$

处理 Treatment		齐穗期 Full heading stage			成熟期 Maturity stage		
		叶 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	穗 Panicle	叶 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	穗 Panicle
	T1	2.38±0.23a	7.20±0.65ab	2.27±0.39a	1.29± 0.14a	4.50±0.11ab	8.99±0.16a
	T2	2.06±0.42a	6.50±0.93b	2.30±0.76a	1.28±0.24a	4.12±0.45b	8.67±0.67a
	T3	2.29±0.43a	8.59±1.82a	2.23±0.35a	1.36±0.14a	4.44±0.24ab	8.40±1.24a
	T4	2.25±0.34a	6.92±0.21ab	2.78±0.99a	1.26±0.03a	4.45±0.74ab	8.28±0.98a
	T5	2.45±0.43a	6.73±1.32ab	2.70±0.82a	1.42±0.20a	4.66±0.53ab	9.01±0.78a
	T6	2.14±0.22a	6.35±0.86b	2.01±0.46a	1.34±0.29a	4.96±0.14a	8.38±0.65a
	T7	2.18±0.49a	6.99±1.04ab	2.22±0.93a	1.33±0.13a	4.68±0.40ab	8.65±0.11a
	T8	2.43±0.06a	7.47±0.46ab	1.90±0.28a	1.28±0.14a	4.40±0.46ab	7.91±0.21a
F 值 *F* value	杂草防治 Weed control (W)	0.4	1.4	0.7	0.2	219.5**	0.2
	病虫防治 Disease and pest control (D)	0.2	9.5*	0.0	0.1	0.2	2.2
	秧苗处理 Seedling treatment (S)	0.6	2.2	0.1	1.1	0.2	2.1
	W×D	0.1	0.2	1.7	0.3	1.7	0.0
	W×S	0.3	2.6	2.0	0.0	0.2	0.5
	D×S	2.4	0.0	0.6	0.1	0.0	0.0
	W×D×S	0.3	1.4	0.0	0.2	1.4	0.1

T1-T8 处理描述见表 1。同列不同小写字母表示不同防治方式处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。The meanings of T1-T8 are shown in the table 1. Different lowercases letters indicate significant differences at $P<0.05$ level among different control methods. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

方式三者互作显著影响茎鞘干物质的输出率和转化率。深耕和减少 30%除草剂用量处理下, 植株的茎鞘干物质的输出量、输出率和转化率较浅耕和常规除草剂用量的杂草防治方法平均分别降低 24.7%、20.5%和 24.8%; 喷施激活蛋白和减少 30%病虫药剂用量的处理, 植株的平均茎鞘干物质的输出量、输出率和转化率较常规病虫药剂用量处理分别高 40.8%、25.9%和 51.2%。其中, T3 处理的茎鞘干物质输出量、输出率和转化率最高, 较最低的 T6 处理分别高 2.0 倍、1.2 倍和 2.1 倍; 另外, T8 处理的茎鞘干物质输出量、输出率和转化率也较高, 但与 T3 处理间没有显著差异。以上结果表明不同的病虫草害防治方式主要通过影响水稻茎鞘的干物质输出和转化来影响水稻成熟期的干物质积累。喷施激活蛋白和减少 30%病虫药剂用量的情况下, 水稻植株在齐穗期的茎鞘干物质量较大, 且齐穗期至成熟期的茎鞘干物质输出和转化也较高。深耕和减少 30%除草剂用量的处理下, 水稻植株在成熟期的茎鞘干物质量较大, 但在齐穗期至成熟期的茎鞘干物质输出和转化相对较小。

表 4　不同防治方式对水稻叶和茎鞘干物质输出和转化的影响

Table 4　Effects of different control methods on dry matter exportation and transformation of rice leaf and stem-sheath

处理 Treatment		叶 Leaf			茎鞘 Stem-sheath		
		输出量 Exportation amount ($t\cdot hm^{-2}$)	输出率 Exportation rate (%)	转化率 Transformation rate (%)	输出量 Exportation amount ($t\cdot hm^{-2}$)	输出率 Exportation rate (%)	转化率 Transformation rate (%)
	T1	1.1±0.1a	45.7±3.2a	16.2±2.4a	2.7±0.5b	37.2±4.1ab	40.4±9.6bc
	T2	0.8±0.3a	37.5±6.7a	12.2±3.6a	2.4±0.5bc	36.4±3.0ab	37.4±7.7bc
	T3	0.9±0.3a	39.8±6.3a	14.9±3.7a	4.2±1.6a	47.2±8.5a	65.9±16.9a
	T4	1.0±0.3a	43.3±7.2a	18.3±3.0a	2.5±0.6bc	35.9±6.3ab	45.7±13.7b
	T5	1.0±0.2a	41.9±2.4a	16.4±4.0a	2.1±0.8bc	29.9±4.8bc	32.7±12.8bc
	T6	0.8±0.1a	38.1±8.2a	12.8±2.5a	1.4±0.8c	21.0±3.5c	21.6±5.6c
	T7	0.8±0.4a	37.6±8.9a	13.8±3.1a	2.3±0.6bc	32.6±4.6bc	37.1±4.6bc
	T8	1.2±0.2a	47.3±7.3a	19.2±3.6a	3.1±0.3ab	41.1±4.5ab	51.0±5.3ab
F 值 *F* value	杂草防治 Weed control (W)	0.2	0.1	0.0	249.3**	20.8*	21.5*
	病虫防治 Disease and pest control (D)	0.2	0.1	1.2	22.9**	11.3*	30.2**
	秧苗处理 Seedling treatment (S)	0.3	0.0	0.0	2.2	1.3	1.3
	W×D	0.1	0.1	0.0	0.3	2.0	0.0
	W×S	1.1	1.5	0.2	2.5	1.1	2.2
	D×S	8.8*	8.8*	7.8*	0.0	0.4	0.2
	W×D×S	0.3	0.1	0.1	4.6	6.1*	5.7*

T1-T8 处理描述见表 1。同列不同小写字母表示不同防治方式处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。The meanings of T1-T8 are shown in the table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ level among different control methods. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

2.4　防治方式对产量和产量构成的影响

从表 5 可以看出, 杂草防治方式以及杂草防治与病虫防治方式互作均显著影响植株的有效穗数; 杂草防治与秧苗处理方式互作显著影响植株的每穗粒数; 而各处理方式及其互作对水稻植株的结实率、千粒重和产量没有显著影响。在有效穗数方面, T6 处理最高; 除 T8 处理外, 深耕的杂草防治处理较浅旋耕的杂草防治处理下植株的有效穗数高 0.5%~12.3%。在每穗粒数方面, T1 和 T8 处理均较高。各处理间在结实率、千粒重和产量方面没有显著差异。说明在减少 30%的化学农药用量时, 并没有显著影响水稻产量。此外, 从表 6 可以看出, 水稻植株的产量与病虫害发生、杂草发生及叶瘟发病情况等呈极显著或显著负相关。

表 5 不同防治方式对水稻产量和产量构成的影响

Table 5 Effects of different control methods on yield and yield components of rice

处理 Treatment		有效穗数 No. of effective panicle ($\times10^4\cdot hm^{-2}$)	每穗粒数 No. of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield ($t\cdot hm^{-2}$)
	T1	243.8±28.2abc	162.5±10.9a	79.5±4.4a	29.1±0.4a	8.8±0.8a
	T2	234.9±16.6c	156.8±11.4 b	80.3±3.2a	29.2±0.2a	8.6±1.3a
	T3	235.5±33.5c	157.8±7.6ab	81.8±3.3a	29.1±0.3a	8.9±0.7a
	T4	237.3±21.6bc	154.4±8.1ab	81.9±5.6a	29.3±0.3a	9.0±0.5a
	T5	256.2±21.2ab	160.2±10.9ab	81.2±4.7a	29.2±0.2a	9.6±0.6a
	T6	263.9±16.8a	159.9±9.6ab	79.2±4.6a	29.1±0.3a	9.4±0.8a
	T7	236.4±28.6bc	150.1±20.5b	82.6±3.5a	29.3±0.3a	9.4±0.9a
	T8	231.8±26.4c	162.0±9.8a	80.6±3.2a	29.2±0.2a	9.5±1.0a
F 值 *F* value	杂草防治 Weed control (W)	7.3*	0.0	0.0	0.3	5.8
	病虫防治 Disease and pest control (D)	3.5	1.7	2.8	1.4	0.3
	秧苗处理 Seedling treatment (S)	0.1	0.1	0.7	0.2	0.2
	W×D	4.7*	0.0	0.1	0.1	0.6
	W×S	0.4	4.3*	1.9	2.9	0.0
	D×S	0.0	2.2	0.1	0.3	2.3
	W×D×S	1.9	1.0	0.0	0.0	0.1

T1-T8 处理描述见表 1。同列不同小写字母表示不同防治方式处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。The meanings of T1-T8 are shown in the table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ level among different control methods. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 6 稻田病虫草害发生与水稻产量和产量构成因素的相关性

Table 6 Correlation between occurrence of diseases, pests, weeds and yield and yield components of rice

时期 Stage	指标 Index		有效穗数 Effective panicle number	每穗粒数 Grains number per panicle	结实率 Seed-setting rate	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield
分蘖期 Tillering	杂草株数 Weed number	莎草科 Cyperaceae	−0.45	0.12	−0.07	−0.19	−0.86**
		阔叶 Broadleaf	−0.38	−0.02	0.02	−0.12	−0.91**
		禾本科 Gramineae	−0.46	−0.13	−0.02	−0.07	−0.92**
	杂草鲜重 Weed fresh weight	莎草科 Cyperaceae	−0.31	0.02	−0.05	−0.14	−0.81*
		阔叶 Broadleaf	−0.55	0.00	−0.05	−0.14	−0.88**
		禾本科 Gramineae	−0.37	−0.04	−0.02	−0.18	−0.93**
	叶瘟病 Leaf blast	发病率 Incidence	−0.24	−0.05	0.14	−0.10	−0.81*
		病情指数 Disease index	−0.21	−0.02	0.12	−0.12	−0.83*
灌浆期 Grain-filling	杂草株数 Weed number	莎草科 Cyperaceae	−0.48	−0.14	0.05	−0.07	−0.93**
		阔叶 Broadleaf	−0.44	0.07	−0.05	−0.32	−0.85**
		禾本科 Gramineae	—	—	—	—	—
	杂草鲜重 Weed fresh weight	莎草科 Cyperaceae	−0.62	−0.21	0.24	−0.02	−0.76*
		阔叶 Broadleaf	−0.33	0.19	−0.33	−0.48	−0.88**
		禾本科 Gramineae	—	—	—	—	—
黄熟期 Yellow ripening	颈瘟病 Panicle blast	发病率 Incidence	−0.05	−0.69	0.48	0.26	−0.19
		病情指数 Disease index	0.14	−0.69	−0.71*	0.36	−0.02
	稻曲病 Rice false smut	病穗率 Diseased panicle rate	−0.43	−0.29	−0.79*	0.74*	0.24
		病粒率 Diseased grain rate	−0.17	−0.45	−0.81*	0.71*	0.40
	整白穗率 Whole white panicle rate		0.22	0.12	−0.39	−0.32	−0.51
	部分白穗率 Partial white panicle rate		0.32	0.18	0.09	0.32	0.75*

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。* and ** mean significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

3　讨论

3.1　防治方式对田间病虫草害发生的影响

化学农药的施用是控制水稻田间病虫草害和保障粮食安全的重要手段之一。然而, 长期以来不合理地使用化学农药也带来了一系列问题[16-17]。因此合理有效利用化学农药来控制病虫草害尤为重要。羊绍武等[18]研究发现, 不同类型的药剂及用量对水稻植株的主要病虫害如稻飞虱、稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)和稻曲病等防治存在明显差异, 分蘖初期喷施化学药剂能有效降低稻飞虱数量。带药移栽则是防治生育前期田间病虫害发生的有效措施之一, 对控制稻田蓟马(*Chloethrips oryzae*)、飞虱、二化螟等前期虫害, 以及对黑条矮缩病、条纹叶枯病等水稻病毒性病害有较好的预防作用[19]。本研究也发现带药移栽后, 水稻植株在分蘖期的稻瘟病发病率降低 18.2%~30.2%。

植物激活蛋白通过诱导和激活植物体内的抗病基因增强植株的抗病能力, 调节植物自身的免疫系统和生长系统, 从而增强作物抵御病虫侵害和不良环境影响, 并促进生长发育[20]。赵利辉等[7]研究表明, 水稻幼苗喷施激活蛋白后, 植株的抗病相关基因 *NPR1* 和 *EIN2* 等转录水平显著提高, 叶片苯丙氨酸解氨酶和 β-1,3-葡聚糖酶等活性均有明显增加, 叶片病斑数量也显著降低。王炳楠等[21]发现从大丽轮枝菌(*Verticillium dahliae*)中分离得到的蛋白激发子可以明显提高植株的苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶和过氧化物酶的活性, 同时诱导抗性相关基因的表达, 从而提高植株的抗逆能力。在本研究中, 常规浅旋耕作下水稻植株喷施大丽轮枝菌激活蛋白后叶瘟发生率明显下降。袁肖寒等[22]研究表明, 新型真菌源植物激活蛋白可以通过诱导水稻植株体内的防御酶过氧化物酶、多酚氧化酶和超氧化物歧化酶活性, 从而提高水稻对稻瘟病的抗性。此外喷施激活蛋白后, 减少 30%的病虫害药剂用量并不会显著增加穗颈瘟发生, 表明植物激活蛋白的施用在一定程度上有利于提高水稻植株的抗病性, 从而达到减少化控药剂用量的目的; 但喷施激活蛋白后, 减少病虫害药剂用量并不利于减少稻曲病的发生。近年来, 稻曲病已成为水稻的主要真菌性病害之一, 因此筛选高效的药剂, 并探索相应的绿色防控措施对稻曲病的防治显得尤为重要。

稻田的耕作方式通过影响土壤的物理性状和杂草种子在土壤中的垂直分布情况等进而影响杂草生长[23]。Chhokar 等[24]研究表明, 水田翻耕处理较免耕和浅耕等方式田间的杂草干物质量更低, 水稻产量更高。本研究结果表明, 田间杂草在深耕栽培下发生情况明显减少; 其中, 深耕处理下分蘖期田间的莎草科、阔叶和禾本科杂草平均株数分别较浅耕处理低 69.6%、67.3%和 96.4%; 同时深耕也有利于减少除草剂用量。这与 Yenish 等[25]和张亚萍[26]的研究结果基本一致。螟虫一直是我国水稻生产上的常发性害虫, 其幼虫可钻入水稻茎秆, 造成枯心苗、枯穗或白穗。本研究发现, 深耕能有效降低水稻白穗率; 同时在叶瘟发病率方面, 深耕处理也明显较轻。表明通过深耕的耕作方式有利于将杂草种子、稻瘟病菌和螟虫虫源等深翻至土壤深处, 从而减少病虫草害的发生。

3.2　防治方式对水稻干物质积累和产量的影响

适宜的耕作和防治方式能有效调控水稻的干物质生产, 而水稻干物质的积累与分配尤其是抽穗至成熟阶段干物质的积累量与水稻的产量密切相关[4,27-28]。杂草作为影响水稻产量的重要因素之一, 可以造成水稻减产 10%~20%[29-30]。胡尊艳[31]研究表明杂草对水稻干物质积累有显著影响, 而喷施除草剂后, 水稻的干物质积累量显著增加。本研究结果表明杂草防治显著影响齐穗期和成熟期茎鞘干物质量, 进而显著影响茎鞘干物质输出和转化。而产量与分蘖期和灌浆期田间的杂草发生也呈显著或极显著负相关。

薛高峰等[32]通过外源接种白叶枯病菌(*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*)后发现水稻植株的根系和地上部干物重显著降低。唐力琼等[33]研究也表明, 稻瘟病菌毒素显著抑制‘冈优 725’植株的各器官干物质积累量, 并显著降低各器官干物质输出率和转化率, 从而导致水稻减产。陈敬等[34]发现外源接种稻瘟病菌孢子后, 水稻植株的结实率和千粒重显著降低。本研究中病虫防治方式显著影响水稻茎鞘干物质积累与转运, 同时叶瘟的发生与产量呈显著负相关, 稻曲病发生与结实率也呈现显著负相关。此外, 通过深耕和植物激活蛋白喷施等方式, 减少 30%的除草剂和病虫害药剂的施用, 各处理间在产量表现上并没有显著差异; 表明通过合理应用深耕、带药移栽和植物激活蛋白等田间耕作及防治方式有利于实现减少病虫害药剂施用以及水稻的稳产, 同时对稻田有害生物绿色防控等方面也起到了一定促进作用。

4 结论

深耕方式下，减少 30%的除草剂用量后，分蘖期和灌浆期的田间莎草科、阔叶和禾本科杂草数量和鲜重较浅旋耕方式显著降低；且深耕方式下，叶瘟的发病率和发病指数以及由螟虫导致的白穗率等较浅旋耕方式低，而成熟期茎鞘干物质量较浅旋耕方式高，表明深耕较浅旋耕更有利于减少水稻病虫草害发生、提高水稻产量。带药移栽后，水稻分蘖期叶瘟发病轻；喷施激活蛋白后，茎鞘的干物质输出和转化明显升高，减少 30%的孕穗期病虫害药剂用量后，穗颈瘟发生并未显著增加，但不利于稻曲病防治。综上表明，通过深耕、带药移栽和植物激活蛋白喷施等方式，可以减少病虫草害等化学药剂的施用量，并保持水稻的稳产。

参考文献 References

[1] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1–11
GUO J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1–11

[2] 陈德西，何忠全，封传红，等. 水稻主要病害发生区划研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(3): 1072–1078
CHEN D X, HE Z Q, FENG C H, et al. Study on occurrence regionalization of rice major diseases[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(3): 1072–1078

[3] 董坤，王海龙，陈斌，等. 水稻种植管理和多元有害生物为害模式特点及其与水稻产量的关系[J]. 生态学报，2009, 29(3): 1140–1152
DONG K, WANG H L, CHEN B, et al. Characterization of patterns of rice cropping practices and multiple pest injury profiles and relation with yield levels[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1140–1152

[4] 程家安，祝增荣. 中国水稻病虫草害治理 60 年：问题与对策[J]. 植物保护学报, 2017, 44(6): 885–895
CHENG J A, ZHU Z R. Development of rice pest management in the past 60 years in China: Problems and strategies[J]. Journal of Plant Protection, 2017, 44(6): 885–895

[5] QIU D W, DONG Y J, ZHANG Y, et al. Plant immunity inducer development and application[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2017, 30(5): 355–360

[6] 刘艳潇，祝一鸣，周而勋. 植物免疫诱抗剂的作用机理和应用研究进展[J]. 分子植物育种, 2020, 18(3): 1020–1026
LIU Y X, ZHU Y M, ZHOU E X. Research progress on the action mechanism and application of plant immune inducers[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(3): 1020–1026

[7] 赵利辉，邱德文，刘峥，等. 植物激活蛋白对水稻抗性相关基因转录水平的影响[J]. 中国农业科学，2005, 38(7): 1358–1363
ZHAO L H, QIU D W, LIU Z, et al. Effect of plant activator protein on the transcription of defense-related genes in rice seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(7): 1358–1363

[8] CHEN F, LI Q, HE Z H. Proteomic analysis of rice plasma membrane-associated proteins in response to chitooligosaccharide elicitors[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(6): 863–870

[9] 邱德文. 植物免疫诱抗剂的研究进展与应用前景[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 39–45
QIU D W. Progress and prospect of plant immunity inducer[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(1): 39–45

[10] 廖永林，李燕芳，刘明津，等. 水稻带药移栽对分蘖期白背飞虱和褐飞虱的防治效果[J]. 环境昆虫学报，2013, 35(3): 311–316
LIAO Y L, LI Y F, LIU M J, et al. Control effect of applying pesticides before transplanting to *Sogatella furcifera* and *Nilaparvata lugens* at rice tillering stage[J]. Journal of Environmental Entomology, 2013, 35(3): 311–316

[11] CHAUHAN B S, GILL G S, PRESTON C. Tillage system effects on weed ecology, herbicide activity and persistence: A review[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2006, 46(12): 1557–1570

[12] SAHRAWAT K L. Fertility and organic matter in submerged rice soil[J]. Current Science, 2005, 88(5): 735–739

[13] LINH T B, SLEUTEL S, GUONG V T, et al. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 44–52

[14] 王秋菊，高中超，张劲松，等. 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 Q J, GAO Z C, ZHANG J S, et al. Black-soil paddy field experiment on improving soil physical and chemical properties and increasing rice yield by continuous deep ploughing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 126–132

[15] 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 C Y, ZHU Y Q. Prediction, Forecast and Control of Main Crop Diseases and Insect Pests[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2006: 49–129

[16] 杨林章，冯彦房，施卫明，等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96–101
YANG L Z, FENG Y F, SHI W M, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 96–101

[17] 徐红星，郑许松，田俊策，等. 我国水稻害虫绿色防控技术的研究进展与应用现状[J]. 植物保护学报，2017, 44(6): 925–939
XU H X, ZHENG X S, TIAN J C, et al. Advances in the development and application of control technologies for insect pest management in paddy fields in China[J]. Journal of Plant Protection, 2017, 44(6): 925–939

[18] 羊绍武, 张晓明, 郭海业, 等. 不同药剂对多年生水稻主要病虫害的田间防治效果[J]. 河南农业科学, 2019, 48(9): 98–102
YANG S W, ZHANG X M, GUO H Y, et al. Control effect of different pesticides on main diseases and pest insects in perennial rice field[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(9): 98–102

[19] 陈将赞, 丁灵伟, 戴以太, 等. 不同药剂带药移栽防治水稻前期害虫试验[J]. 浙江农业科学, 2014, 55(12): 1827–1829
CHEN J Z, DING L W, DAI Y T, et al. Experiment on the control of early pests of rice by transplanting with different medicaments[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2014, 55(12): 1827–1829

[20] KHAN N U, LIU M J, YANG X F, et al. Fungal elicitor MoHrip2 induces disease resistance in rice leaves, triggering stress-related pathways[J]. PLoS One, 2016, 11(6): e0158112

[21] 王炳楠, 王双超, 檀贝贝, 等. 大丽轮枝菌蛋白激发子 PevD1 诱导的烟草对烟草花叶病毒(TMV)系统获得性抗性及其分子机制[J]. 农业生物技术学报, 2012, 20(2): 188–195
WANG B N, WANG S C, TAN B B, et al. Systemic acquired resistance to tobacco mosaic virus (TMV) induced by protein elicitor from *Verticillium dahliae* (PevD1) and its mechanisms in tobacco[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2012, 20(2): 188–195

[22] 袁肖寒, 顾成波, 邱德文, 等. 新型真菌源激活蛋白诱导水稻抗病性及其生理机制[J]. 植物研究, 2013, 33(2): 220–224
YUAN X H, GU C B, QIU D W, et al. Rice disease resistance induced by new fungal activator protein and its physiological mechanism[J]. Bulletin of Botanical Research, 2013, 33(2): 220–224

[23] CHAUHAN B S, JOHNSON D E. Influence of tillage systems on weed seedling emergence pattern in rainfed rice[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 15–21

[24] CHHOKAR R S, SHARMA R K, GATHALA M K, et al. Effects of crop establishment techniques on weeds and rice yield[J]. Crop Protection, 2014, 64: 7–12

[25] YENISH J P, DOLL J D, BUHLER D D. Effects of tillage on vertical distribution and viability of weed seed in soil[J]. Weed Science, 1992, 40(3): 429–433

[26] 张亚萍. 耕作深度和茬口模式对上海浦东稻田杂草土壤种子库多样性的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2018
ZHANG Y P. Diversity of soil weed seedbank in response to different tillage and cropping systems in Shanghai Pudong[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018

[27] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1927–1936
AO H J, WANG S H, ZOU Y B, et al. Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(7): 1927–1936

[28] 邓飞, 王丽, 刘利, 等. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1930–1942
DENG F, WANG L, LIU L, et al. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1930–1942

[29] 李扬汉. 中国杂草志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1–10
LI Y H. Chinese Weeds[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998: 1–10

[30] 朱文达. 稗对水稻生长和产量性状的影响及其经济阈值[J]. 植物保护学报, 2005, 32(1): 81–86
ZHU W D. Influence of barnyardgrass, *Echinochloa crusgalli*, on the growth and yield of paddy rice and its economic threshold[J]. Journal of Plant Protection, 2005, 32(1): 81–86

[31] 胡尊艳. “稻杰”对水稻生长发育的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2009, 31(1): 58–59
HU Z Y. Effect of “Daojie” on growth and development of paddy rice[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2009, 31(1): 58–59

[32] 薛高峰, 孙万春, 宋阿琳, 等. 硅对水稻生长、白叶枯病抗性及病程相关蛋白活性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(4): 690–697
XUE G F, SUN W C, SONG A L, et al. Influence of silicon on rice growth, resistance to bacterial blight and activity of pathogenesis-related proteins[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(4): 690–697

[33] 唐力琼, 胡运高, 张玲, 等. ‘冈优 725’对四个稻瘟病菌生理小种毒素的响应[J]. 植物保护学报, 2013, 40(1): 15–19
TANG L Q, HU Y G, ZHANG L, et al. Response of ‘Gangyou725’ to the toxin of four rice blast fungus *Magnaporthe oryzae* physiological races[J]. Journal of Plant Protection, 2013, 40(1): 15–19

[34] 陈敬, 易军, 蒋芬, 等. 不同稻瘟病菌生理小种对水稻产量性状的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 298–301
CHEN J, YI J, JIANG F, et al. Effect of different physiological races of rice blast fungus on rice yield traits[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(2): 298–301