

不同稻田综合种养模式下杂草长期控制效果的调查

张 峥 卜德孝 强 胜*

(南京农业大学杂草研究室, 南京 210095)

摘要:为明确稻田综合种养模式是否可以长期有效控制杂草危害,通过对江苏省48个样点共6种综合种养模式(稻鸭、稻蟹、稻虾、稻鱼、稻鳖和稻鳅/鳝共作)农田的杂草群落和土壤种子库进行调查,比较分析杂草群落综合草情优势度、物种多样性以及杂草群落和土壤种子库的组成和变化。结果表明,在综合种养模式实施1~3年,杂草群落综合草情优势度和土壤种子库密度均明显下降,其中稻鸭共作模式下两者均下降最多,其次是稻虾共作模式下杂草群落综合草情优势度下降较多,而稻鱼共作模式下土壤种子库密度下降较多。实施4~5年,各种养模式下杂草群落综合草情优势度和土壤种子库密度均上升,草害加剧,杂草防控效果下降;其中稻鳅/鳝共作模式下杂草群落综合草情优势度和土壤种子库密度与常规稻田相比升幅最大,分别上升28.8%和25.3%;由于稻鳖、稻鳅/鳝共作模式实施均未超过5年,在实施4~5年时整体上杂草危害最为严重,禾本科杂草、阔叶杂草以及莎草科杂草的综合草情优势度较常规稻田分别上升42.4%、12.3%、0.7%和31.5%、27.7%、38.1%。实施5年以上,稻鸭共作模式下阔叶杂草的综合草情优势度较常规稻田下降65.0%,但禾本科杂草的综合草情优势度和土壤种子库密度较常规稻田分别上升80.5%和66.6%,成为杂草群落和土壤种子库的优势种群;稻虾共作模式下莎草科杂草和阔叶杂草的综合草情优势度较常规稻田分别上升17.8%和45.0%;稻蟹共作模式下莎草科杂草、阔叶杂草和禾本科杂草的综合草情优势度较常规稻田分别上升22.7%、35.3%和29.0%。表明当长期实施同种稻田综合种养模式时,杂草群落在单一的选择压力下会加快演替,杂草危害均呈先降后升的变化趋势,不利于田间杂草的长效防控,建议实施针对耗竭土壤种子库的综合技术措施。

关键词: 稻田综合种养模式; 杂草群落组成; 杂草危害; 影响因素; 选择压力

A field investigation of long-term weed control via different types of rice-aquaculture integrated cultivations

Zhang Zheng Bu Dexiao Qiang Sheng*

(Weed Research Laboratory, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu Province, China)

Abstract: In order to clarify whether rice-aquaculture integrated cultivation modes can effectively control weeds for a long term, a total of 48 sampling sites with six main kinds of rice-aquaculture integrated cultivation modes, including rice-duck, rice-crab, rice-crayfish, rice-fish, rice-turtle, and rice-loach/mud eel, were investigated. Comprehensive infestation index, species diversity, the composition of weed communities and soil seed banks were comparatively analyzed using multivariate statistical analysis. The results showed that in one to three years after the implementation of the rice-aquaculture integrated cultivation, the comprehensive weed dominance and seed bank density decreased, mostly under the rice-duck farming system, followed by rice-crab system for comprehensive weed dominance and by

rice-fish for seed bank density. However, after being implemented for four to five years, the weed infestation aggravated with increasing seed bank size and comprehensive weed dominance, and weed control effect markedly decreased. The comprehensive weed dominance and seed bank size increased 28.8% and 25.3%, respectively, after four to five years of implementation under rice-loach/mud eel farming system compared with conventional rice cropping system. After implementation of the rice-turtle and rice-loach/mud eel farming systems for four to five years, the weed infestation became more serious, and the comprehensive weed dominance of grass, broadleaf and sedge weeds increased by 42.4%, 12.3%, 0.7%, and 31.5%, 27.7%, 38.1%, respectively. After being implemented for more than five years, in rice-duck fields, the comprehensive weed dominance of broadleaf weeds decreased by 65.0%, while the comprehensive weed dominance and seed bank density of grass weeds increased by 80.5% and 66.6%, respectively, and grass weeds succeeded into the dominant populations. In rice-crayfish fields, the comprehensive weed dominance of sedge weeds and broadleaf weeds increased 17.8% and 45.0%, respectively. In rice-crab fields, the comprehensive weed dominance of sedge weeds, broadleaf weeds and grass weeds increased 22.7%, 35.3% and 29.0%, respectively. Overall, under the selection pressure of long-term implementation of the same rice-aquaculture integrated cultivation, weed community quickly succeeded, and weed infestations demonstrated a fluctuated trend of first decrease and increase late. Long-term implementation of a single rice-aquaculture integrated cultivation was not conducive to the long-term weed control in fields. Therefore, we proposed that integrated control measures should be adopted to deplete soil seed bank.

Key words: rice-aquaculture integrated cultivation pattern; composition of weed community; harmfulness of weed; influence factors; selective pressure

农田杂草是长期适应当地的自然环境、生产条件和耕作制度,并与栽培作物在各方面的竞争过程中逐渐形成的群落。自然选择压力和人为选择压力是推动杂草群落发生改变的动力。选择压力由当地的气候环境条件和作物-杂草的管理活动而产生,气候和环境选择可能导致杂草种群之间区域性或者渐变群格局的分化(Michael et al., 2006),而作物-杂草的管理活动能导致适应本土的杂草生物型累积。在一定区域内,随着作物体系、耕作措施和农艺措施的变化,杂草种群的适应策略就会在更细小的空间(田块对田块)和时间(年度对年度)尺度上发生改变。

水稻是世界3大主要粮食作物之一,也是中国最重要的粮食作物。稻田杂草是影响水稻生长发育和产量的主要不利因素之一。长期以来,稻田杂草防治主要依赖化学除草剂,化学除草具有节省劳力、除草及时和经济效益高等优点;但是随着除草剂的持续、大量使用,特别是长期使用单一除草剂,除草剂逐渐称为影响和改变植物种群遗传组成的外界压力(张武, 2011),大量对除草剂敏感的个体被杀死而减少,而另一些不敏感或已产生抗性的个体得以繁衍,致使农田杂草种群迅速更迭,群落结构发生改

变,演替加速,次要杂草上升为优势种群并孳生为害,增加了防除难度(Chancellor, 1979; 黄顶成等, 2005)。除抗药性以外,除草剂的药害问题也日趋严重,农田环境污染问题显现,传统稻田草害防控体系面临巨大挑战。随着人们对食品安全和环境保护意识的增强,化学除草剂使用所造成的问题越来越受到重视。实现稻田除草剂减量增效,发展稻田绿色防控措施,构建环保、生态的稻田可持续草害防控技术体系已成为水稻生产中迫切需要解决的难题,目前我国在这方面已取得了一定的进展(程家安和祝增荣, 2017; 徐红星等, 2017)。利用生物生态学理论防控稻田有害生物,进行无公害、绿色、有机稻米的生产,已成为构建杂草防控体系的主要方向。

稻渔综合种养是以产业化生产方式在稻田中开展水产养殖的特殊模式,以水稻生产(稳产)为前提,在稻田中养殖鸭、鱼、虾和蟹等水生动物,通过动物在稻田的取食、活动等行为减轻稻田草害和水稻病虫害,是一种稻渔结合的综合种养模式(Frei & Becker, 2005; Lu & Li, 2006; Huang et al., 2014)。当前,我国已经发展了稻鸭、稻鱼、稻鳖、稻小龙虾、稻蟹和稻鳅等多种共作、轮作和连作模式(孟顺龙等, 2018; 王强盛等, 2019; 江洋等, 2020)。但是,目前关

于稻田综合种养的研究主要集中在特定的种养模式和传统稻作模式之间的比较以及生态和经济效益分析方面,包括抑病、治虫(孙国俊等,2008)、除草(吕东锋等,2011;徐大兵等,2015;刘全科等,2017;)、增肥(蒋业林等,2015;袁泉等,2020)、对水稻品质以及产量(张剑等,2017)和生物多样性的影响(袁伟玲等,2010)等;而关于在长期综合种养选择压力下农田杂草群落演替规律的研究很少,对长期实施综合种养下土壤杂草种子库动态变化的影响研究更少。其中,南京农业大学杂草研究室连续多年研究了稻鸭共作模式下田间杂草群落和土壤杂草种子库的特征及其动态变化规律,发现在长期稻鸭共作模式下土壤种子库密度和田间杂草密度均逐年降低,稻田杂草群落的物种多样性持续降低,群落均匀度提高(Li et al., 2012; 魏守辉等, 2006; 2013; 赵灿等, 2014)。然而,生产实际中单一的综合种养模式持续施用一定时间后,长期施加的单一选择压力促进了杂草种群的演替,新的顶级优势杂草群落形成,从而导致所施用的控草措施失效,为了挽回粮食损失,在实施综合种养模式过程中仍然需要额外投入大量的人力、财力控制草害。土壤杂草种子库是当季杂草向下一季进行转换的纽带,种子库是数量庞大的潜在杂草群落,反映了该地区土地利用方式对地上杂草植被的长期影响。比较分析不同综合种养与常规管理模式杂草群落动态及演替方向,以及土壤种子库的动态变化,有利于从根本上分析综合种养模式对杂草种群演替的影响。为此,本研究针对在全国较早开展稻田综合种养模式的江苏省所实施的主要6种综合种养模式下田间杂草及其土壤种子库开展调查,分析综合种养模式对杂草群落演替的影响和系统控草效果,以期为稻田综合种养模式下合理控草策略的选择和制定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

调研区概况:江苏省总面积 $10.72 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中69%为平原,耕地面积达 $4.59 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中水田面积为 $2.98 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。江苏省水资源丰富,自北向南有沂沭河、淮河及长江3大水系,其中长江为流经江苏省最大的河流,呈东西向横穿,省内全境425 km,将江苏省分割为南北2部分。江苏省位于亚洲大陆东岸中纬度地带,属东亚季风气候区,处在亚热带和暖温带的气候过渡地带,地势平坦,一般以淮河、苏北灌溉总渠一线为界,以北地区属暖温带湿润、半湿润

季风气候,以南地区属亚热带湿润季风气候。年平均气温 $13 \sim 16^\circ\text{C}$,年均降雨量 $800 \sim 1\ 200 \text{ mm}$,雨热充足,灌溉良好,栽培稻为最主要的秋熟作物。

综合种养模式样点:江苏省现有13个地级市,96个县(市、区),分为苏南、苏中和苏北3个区域。苏南地区包括南京、苏州、无锡、常州和镇江5个市;苏中地区包括扬州、泰州和南通3个市;苏北地区包括徐州、连云港、宿迁、淮安和盐城5个市。选取的6种综合种养模式(稻鸭、稻虾、稻蟹、稻鱼、稻鳖、稻鳅/鳝共作)至少分别在苏南、苏中和苏北3个区域中的2个区域有分布,且选择的各个综合种养样点面积均在 $5\ 000 \text{ m}^2$ 以上,每种综合种养模式的实施年限尽可能多样化,按照实施年限的长短分为3组,分别为1~3年、4~5年和大于5年,每种综合种养模式至少选择2组年限,每组年限至少3个样点,样点在当地具有代表性。

仪器:eTrex10 GPS,美国Garmin公司;SZX7双目解剖镜,日本Olympus公司。

1.2 方法

1.2.1 不同种养模式下杂草群落的调查方法

于2019年9—10月在水稻成熟期对6种不同综合种养模式(稻鸭、稻虾、稻蟹、稻鱼、稻鳖、稻鳅/鳝)不同实施年限下稻田的杂草群落组成和危害情况进行调查。首先,将各共作种养稻田按实施年限分为1~3年、4~5年和大于5年3组,每种模式每组实施年限各选取3个样点(其中稻鳖、稻鳅/鳝共作模式的实施年限均未超过5年),记录样点的GPS定位、综合种养模式实施年限、前茬作物种植情况以及水稻种植前的灌水(淹水)情况;并在各综合种养模式调查样点附近选取常规种植的稻田作为对照,每个常规稻田样点面积均大于 $2\ 000 \text{ m}^2$ 。共计48个综合种养模式调查样点,48个常规稻田样点。每个样点随机选取10个样地,每个样地面积均不小于 $2\ 000 \text{ m}^2$,样地间隔不小于10 m,使用七级目测法(强胜,2009),通过相对盖度、多度和相对高度3个指标综合确定各杂草的优势度(危害度),优势度共分为7个级别,从高到低依次赋值5、4、3、2、1、0.5、0.1,计算每个调查样点各杂草的综合危害指数 V 和不同综合种养稻田的杂草群落综合草情优势度 V_s , $V = \frac{\sum_{i=1}^7 (a \times b)}{c \times 5} \times 100\%$,式中 a 为级别值; b 为 a 级别出现的次数; c 为每个样点的样地数。 $V_s = \sum_{i=1}^s V_i$,式中 V_i 为第 i 种杂草的综合危害指数; s 为某样点杂草的总

种类数。同时对杂草群落的综合草情优势度 V_j 随综合种养实施年限的变化情况进行曲线拟合。

1.2.2 不同种养模式下土壤杂草种子库的调查方法

2019年11—12月在稻收后进行土壤种子库取样,土壤取样的样点和样地设置同1.2.1杂草调查。取样时,每个样地采用W型九点取样法,使用内径为50 mm的圆柱形土壤取样器,钻取0~10 cm土层的9个土样,每个综合种养模式样点设10个样地,共取90个土样,每个常规稻田样点也共取90个土样,分别混装后带回实验室。将采集的土样自然风干,稍加粉碎、混匀后平均分成30份(每份折合土表面积约0.006 m²),取其中3份土样使用筛洗法进行测定。将每份土样分别倒入孔径为0.1 mm的标准分样筛中,筛去细土后用自来水冲洗,除去淤泥,然后将分样筛中残留物自然风干。然后用孔径为0.9、0.45、0.3、0.2、0.15、0.125、0.1 mm的标准分样筛分级筛选,各孔径网筛中的剩余物分装于培养皿中。在双目解剖镜(最大放大倍数10×4倍)下统计杂草种子的种类和数量,计算每个样点的土壤杂草种子库密度 B ,即每平方米的种子数量。同时对土壤杂草种子库密度随综合种养实施年限的变化情况进行曲线拟合。

1.2.3 各种养模式下杂草群落的聚类与多样性分析

使用PC-ORD 5.0软件对各样点的各类杂草综合危害指数和种养模式进行双向聚类并生成树状图,距离测度采用Euclidean距离,聚类方法采用最大距离法。同时计算各样点的杂草群落物种丰富度和多样性指数,物种丰富度 S 即每个样点包含的所有杂草种类数;多样性指数即Shannon-Wiener多样性指数 H' , $H' = -\sum_{i=1}^s \left(\frac{V_i}{V_s} \right) \ln \left(\frac{V_i}{V_s} \right)$ 。

$$H' = -\sum_{i=1}^s \left(\frac{V_i}{V_s} \right) \ln \left(\frac{V_i}{V_s} \right)$$

1.2.4 各种养模式下稻田杂草群落和种子库相似性分析

依据土壤杂草种子库中潜在杂草群落发生的季节和作物田,将杂草群落划分为稻田杂草、秋熟旱田杂草和夏熟旱田杂草3类,分别计算不同综合种养模式下稻田杂草群落在土壤种子库中的占比,并对地上稻田杂草群落与土壤种子库中潜在杂草群落的相似性分别采用Bray-Curtis距离指数和Sørensen相似性指数进行分析。Bray-Curtis距离指

$$D_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{ji} - B_{ki}|}{\sum_{i=1}^n (V_{ji} + B_{ki})}$$

杂草的综合危害指数; B_{ki} 指土壤种子库 k 中第 i 种杂

草的土壤种子库密度; n 指杂草群落 j 和土壤种子库 k 中的杂草总种类数;用于计算的数值需进行比例转换。Sørensen相似性指数 $C_{jk} = 2N_c / (N_a + N_b)$, 式中 N_c 为杂草群落 j 与土壤种子库 k 所共有的物种数; N_a 为杂草群落 j 含有的全部物种数; N_b 为土壤种子库 k 含有的全部物种数。

1.3 数据分析

采用SPSS 26.0软件对试验数据进行统计分析,应用最小显著差数(LSD)法进行差异显著性检验,用Origin 9.1和PC-ORD 5.0软件制图。

2 结果与分析

2.1 种养模式和实施年限对稻田杂草群落的影响

综合种养模式和实施年限对稻田杂草群落的组成和危害程度均有影响。杂草群落的综合草情优势度随综合种实施年限的变化趋势符合三项式拟合曲线,拟合优度 $R^2 \geq 0.653$,拟合结果较好。拟合曲线显示,不同综合种养模式下杂草群落的综合草情优势度总体上均呈先降低后升高的趋势,在实施1~3年呈下降趋势,实施5年以上则呈上升趋势,但是不同种养模式对不同类型杂草的防控作用存在差异(图1~2)。

稻鸭共作模式在实施3年左右时,对杂草的整体防控效果最佳,与常规稻田相比,综合草情优势度降低46.8%,其中阔叶杂草、莎草科杂草以及禾本科杂草的综合草情优势度分别降低72.5%、30.4%和13.6%;实施5年以上,与常规稻田相比,阔叶杂草的综合草情优势度降低65.0%;表明稻鸭共作模式对阔叶杂草始终表现出较好的控制作用,其综合草情优势度平均下降72.8%;而对禾本科杂草只在实施初期有一定的防控效果,随着实施年限的延长,禾本科杂草的危害加重,实施4~5年禾本科杂草的综合草情优势度平均上升29.9%,实施5年以上其综合草情优势度上升80.5%,禾本科杂草逐渐上升为田间的优势杂草,草害较常规稻田严重(图2-a)。

稻虾、稻蟹共作模式对杂草的防控作用相似,实施初期对禾本科杂草和阔叶杂草均有一定的防控效果,但长期实施后杂草的危害加重,阔叶杂草大量发生。与常规稻田相比,稻虾和稻蟹共作模式实施1~3年,禾本科杂草的综合草情优势度分别下降46.4%和36.5%,阔叶杂草的综合草情优势度分别下降21.7%和11.7%,对禾本科杂草的防控效果略高于阔叶杂草;实施5年以上,对禾本科杂草的防控效

果降低,阔叶杂草和莎草科杂草危害加重,稻虾共作模式下禾本科杂草的综合草情优势度只下降4.1%,阔叶杂草和莎草科杂草的综合草情优势度则分别上升17.8%和45.0%,而稻蟹共作模式下禾本科杂草、阔叶杂草和莎草科杂草的综合草情优势度分别上升29.0%、22.7%和35.3%,表明稻虾和稻蟹共作模式实施5年以上,阔叶杂草和莎草科杂草成为田间优势杂草种群(图2-b~c)。

稻鱼共作模式对阔叶杂草的防控作用略高于禾本科杂草,实施1~3年,阔叶杂草和禾本科杂草的综合草情优势度分别降低29.1%和24.3%,实施5年以上,禾本科杂草的综合草情优势度升高16.2%,逐渐成为优势杂草群落,杂草群落的综合草情优势度与

常规稻田相比略有上升(图2-d)。

稻鳖、稻鳅/鳝共作模式均不能有效防控杂草,这2种模式都只在实施初期对阔叶杂草和莎草科杂草有较低的防控效果,实施1~3年,阔叶杂草的综合草情优势度分别降低26.7%和14.1%;实施4~5年以上,阔叶杂草、禾本科杂草以及莎草科杂草的综合草情优势度均上升,其中禾本科杂草的综合草情优势度上升幅度最高,在稻鳖、稻鳅/鳝共作模式下平均分别升高42.4%和31.5%,阔叶杂草的综合草情优势度平均分别升高12.3%和27.7%,莎草科杂草的综合草情优势度平均分别升高0.7%和38.1%,禾本科成为优势杂草种群,整体上杂草群落的综合草情优势度则分别上升20.3%和28.8%(图2-e~f)。

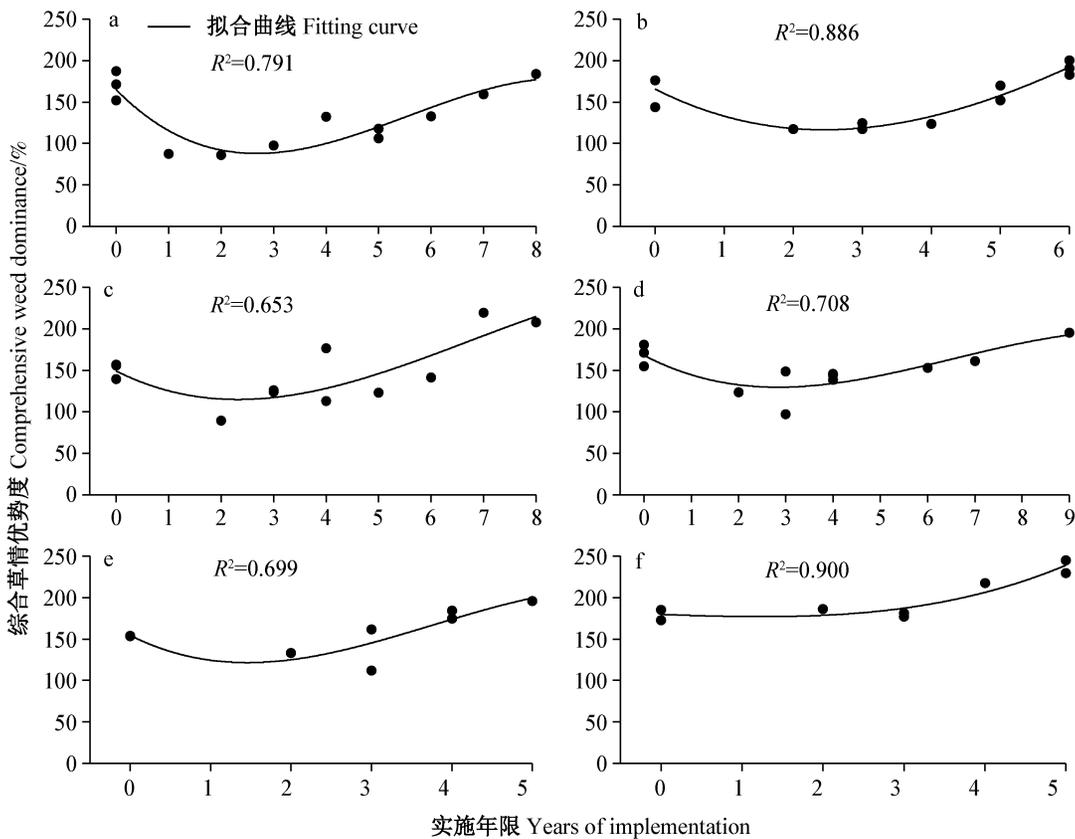


图1 不同稻田综合种养模式下杂草综合草情优势度随时间的变化
a: 稻鸭; b: 稻虾; c: 稻蟹; d: 稻鱼; e: 稻鳖; f: 稻鳅/鳝。a: Rice-duck; b: rice-crayfish; c: rice-crab; d: rice-fish; e: rice-turtle; f: rice-loach/mud eel.

图1 不同稻田综合种养模式下杂草综合草情优势度随时间的变化

Fig. 1 Change of comprehensive weed dominance with time under different rice-aquaculture integrated cultivation modes

2.2 种养模式和实施年限对土壤种子库的影响

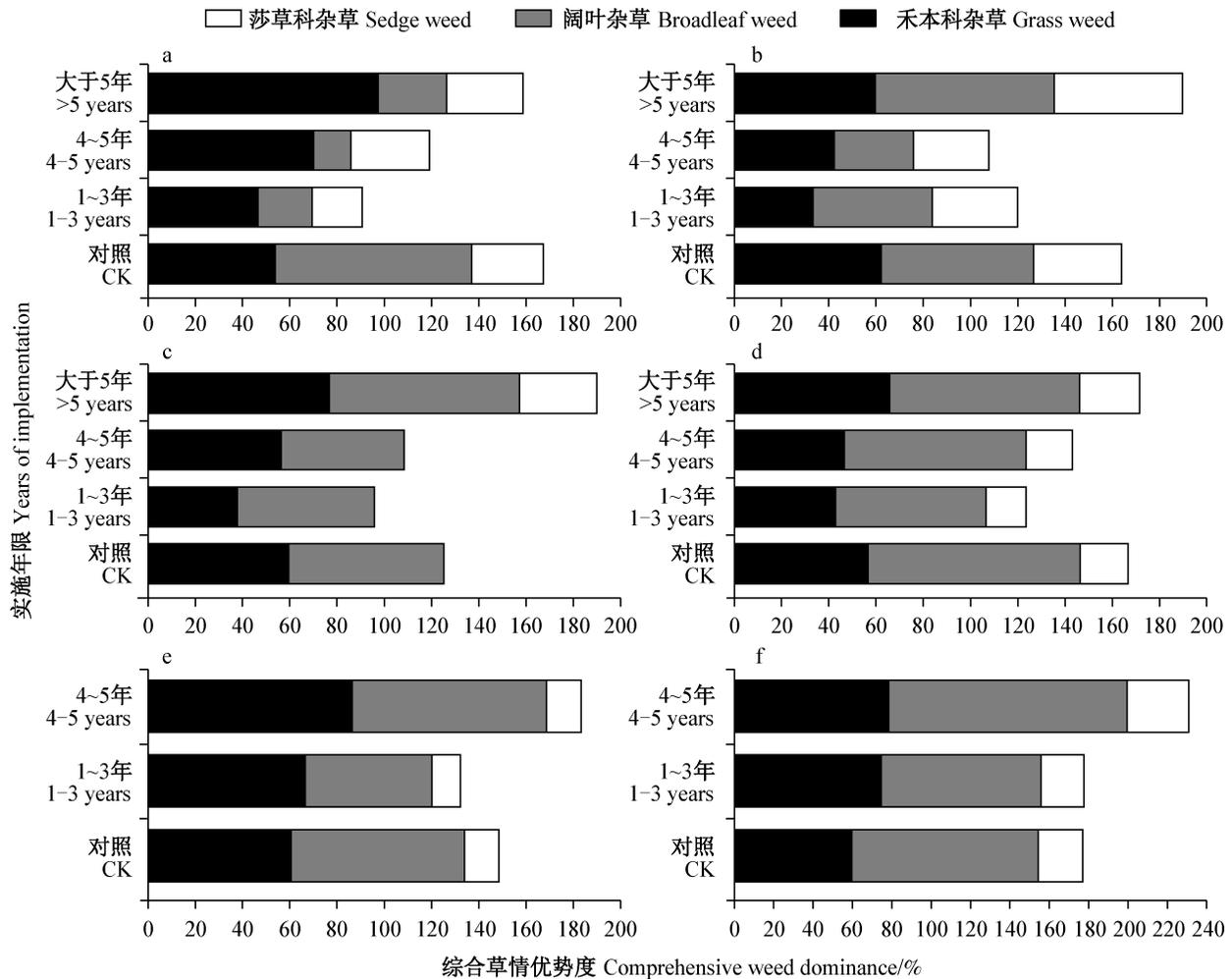
综合种养模式和实施年限影响土壤杂草种子库的组成和密度。土壤杂草种子库密度随综合种养模式实施年限的变化趋势符合三项式拟合曲线,拟合优度 $R^2 \geq 0.599$,拟合结果较好。拟合曲线显示,不同综合种养模式下土壤杂草种子库密度总体上均呈先

降低后升高的趋势,在实施1~3年时呈下降趋势,实施5年以上土壤种子库密度则均呈上升趋势,但是不同种养模式对不同类型杂草土壤种子库的防控作用存在差异(图3~4)。

稻鸭共作模式下,与常规稻田相比,实施1~3年土壤中禾本科杂草种子库密度有小幅下降,但实

施4~5年禾本科杂草种子库密度开始上升,实施5年以上禾本科杂草种子库密度上升66.6%,禾本科种子库密度占土壤杂草种子库总密度的比例从29.7%上升至53.7%,阔叶杂草种子库占比则从

49.2%下降至21.2%,莎草科杂草种子库占比略有上升,从21.1%上升到25.0%,禾本科杂草上升为稻田中的主要杂草(图4-a)。



a: 稻鸭; b: 稻虾; c: 稻蟹; d: 稻鱼; e: 稻鳖; f: 稻鳅/鳝。a: Rice-duck; b: rice-crayfish; c: rice-crab; d: rice-fish; e: rice-turtle; f: rice-loach/mud eel.

图2 不同稻田综合种养模式下不同类型杂草群落随时间的变化

Fig. 2 Change of three different types of weeds with time under different rice-aquaculture integrated cultivation modes

稻虾、稻蟹和稻鱼共作模式在实施初期,对禾本科和阔叶杂草均有一定的控制效果,但长期实施后土壤杂草种子库密度上升。与常规稻田相比,实施1~3年,稻虾、稻蟹共作模式下禾本科杂草种子库密度的降幅分别为35.9%和34.8%,略高于阔叶杂草种子库密度的降幅9.6%和15.2%,稻鱼共作模式下禾本科杂草种子库密度的降幅为16.6%,低于阔叶杂草种子库密度的降幅43.7%;实施5年以上,土壤杂草种子库总密度均上升,稻虾、稻蟹和稻鱼共作模式下的升幅分别为7.9%、9.1%和5.2%,其中稻蟹共作模式下莎草科杂草种子库密度的升幅最大,为

35.5%(图4-b~d)。

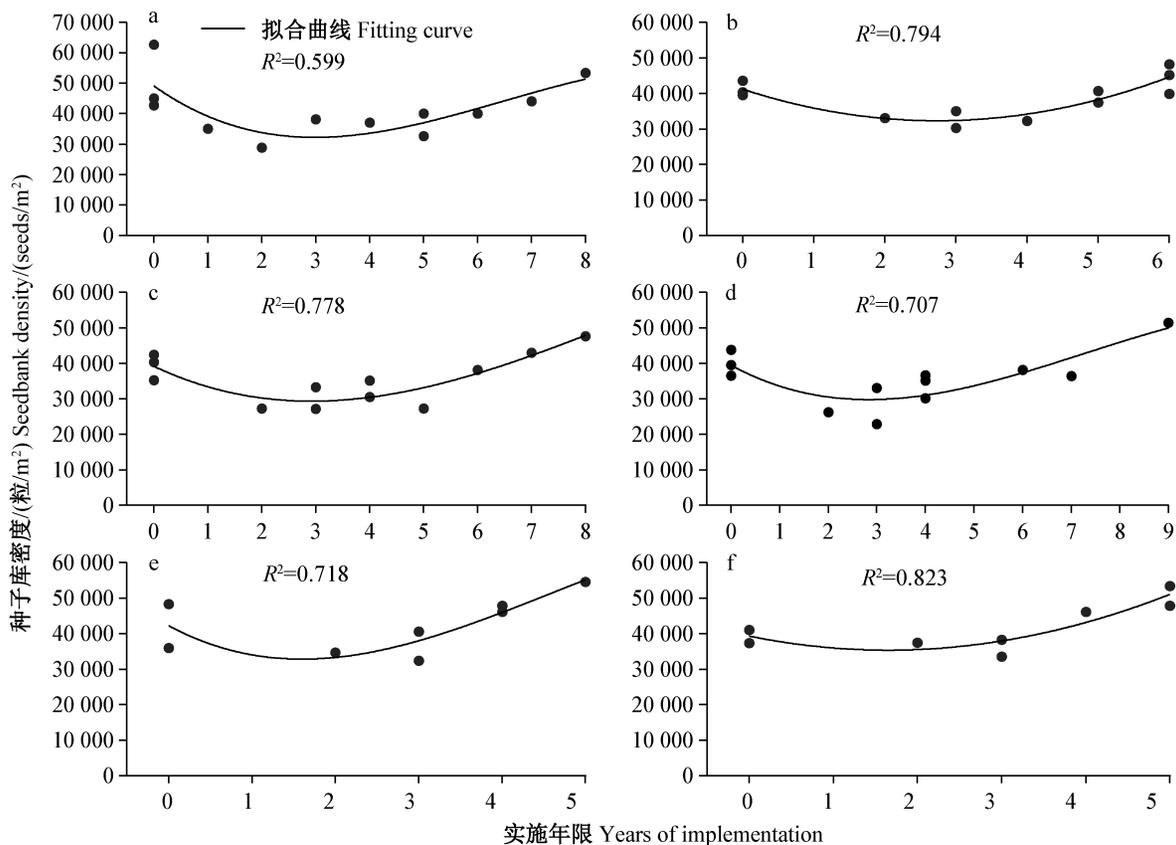
稻蟹和稻鳅/鳝共作模式均不能有效降低土壤杂草种子库密度,实施4~5年,稻蟹和稻鳅/鳝模式下土壤中禾本科杂草种子库密度的升幅分别为51.4%和25.2%,阔叶杂草种子库密度的升幅分别为30.5%和31.0%,整体上杂草种子库总密度分别上升17.9%和25.3%,杂草危害整体呈加重态势。

2.3 种养模式对杂草群落组成的影响

不同综合种养模式下田间优势杂草群落组成存在差异,随着实施年限的延长,各综合种养模式下优势杂草群落组成差异明显。总体上,6种综合种养

模式和常规稻田可分为3大类, 稻鸭共作单独划为一类; 稻虾、稻蟹共作模式以及常规稻田划为第2类, 稻鱼、稻鳖和稻鳅/鳝共作模式划为第3类。与常规稻田相比, 稻鸭共作模式对阔叶杂草的控制效果较好, 禾本科杂草成为田间绝对优势种群, 主要杂草群落组成为稗 *Echinochloa crusgalli*、千金子 *Leptochloa chinensis*、异型莎草 *Cyperus difformis* 和李氏禾 *Leersia hexandra*, 稻鸭共作模式长期实施导致田间杂草群落的综合草情优势度上升, 草害加重; 稻虾和

稻蟹共作模式下, 阔叶杂草、禾本科杂草以及莎草科杂草的发生均较为严重, 主要杂草群落组成为稗、千金子、鸭舌草 *Monochoria vaginalis*、鳢肠 *Eclipta prostrata* 和异型莎草, 与常规稻田杂草群落组成相似; 稻鱼、稻鳖和稻鳅/鳝共作模式均不能有效防控杂草, 杂草发生量大, 危害严重, 其中禾本科杂草稗和千金子的综合危害指数最高, 主要杂草群落组成为稗、千金子、鳢肠和鸭舌草(图5)。



a: 稻鸭; b: 稻虾; c: 稻蟹; d: 稻鱼; e: 稻鳖; f: 稻鳅/鳝。a: Rice-duck; b: rice-crayfish; c: rice-crab; d: rice-fish; e: rice-turtle; f: rice-loach/mud eel.

图3 不同稻田综合种养模式下土壤杂草种子库密度随时间的变化

Fig. 3 Change of weed seedbank densities with time under different rice-aquaculture integrated cultivation modes

2.4 不同种养模式下杂草的物种丰富度和多样性指数

总体而言, 稻鸭共作模式下杂草发生种类最少, 平均约9种, 物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于其他5种种养模式, 对于阔叶杂草的防控效果较好; 稻虾、稻蟹和稻鱼共作模式下杂草发生种类与常规稻田无显著差异, 其中稻虾共作模式下平均为11种, 稻蟹和稻鱼共作模式下平均为10种, 但稻蟹和稻鱼共作模式下杂草群落的 Shannon-Wiener 物种多样性指数显著低于常规稻田, 表明稻虾、稻蟹和稻鱼这3种共作模式对杂草均有一定的防控

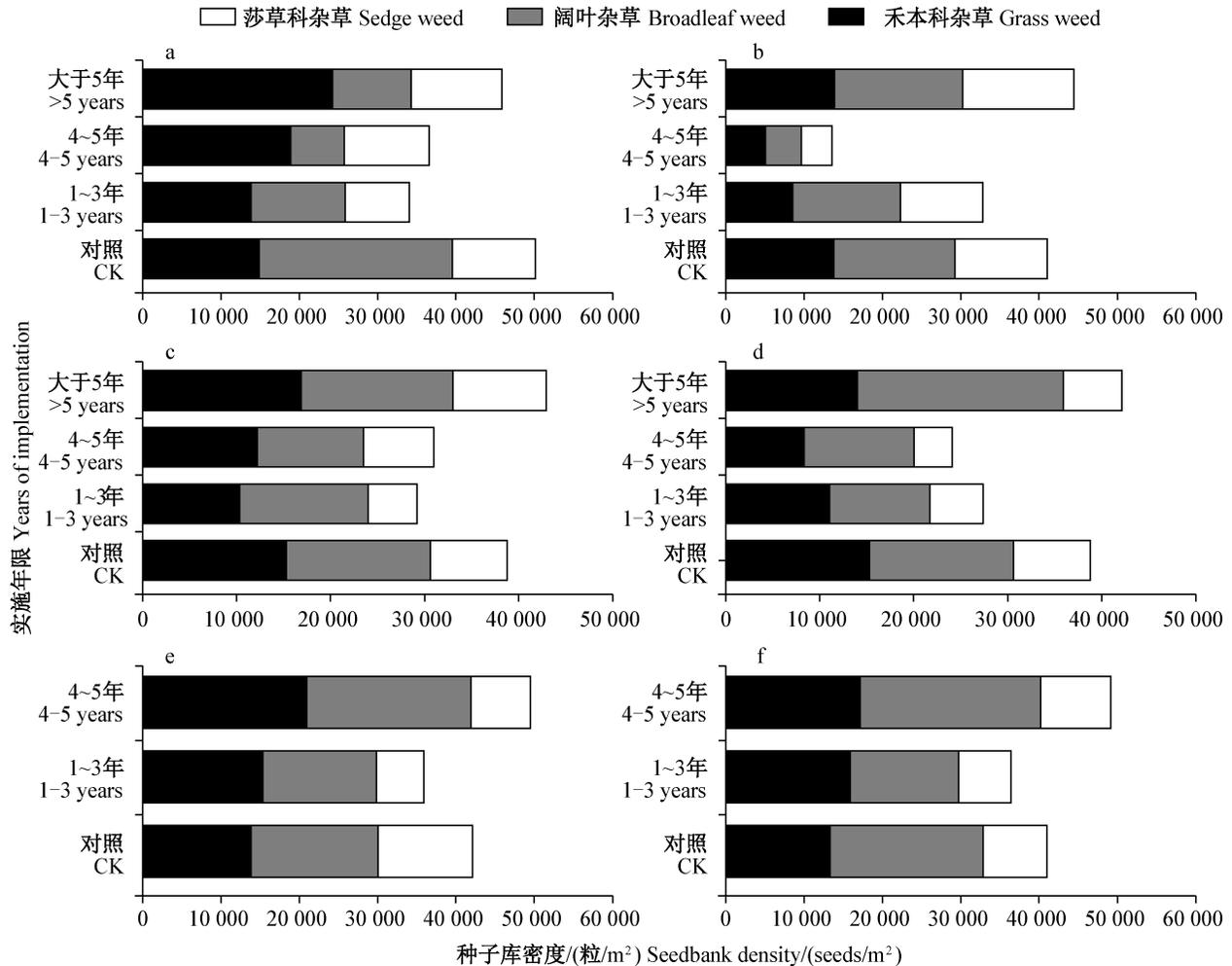
效果; 稻蟹和稻鳅/鳝共作模式下杂草发生种类最多, 平均分别为13种和14种, 显著高于常规稻田, 说明这2种共作模式对杂草的整体防控效果不佳, 禾本科杂草、阔叶杂草和莎草科杂草均有较大的发生量, 危害严重, 水稻的生长受到较大影响(图6)。

2.5 不同种养模式下杂草群落和种子库相似性比较

调查结果显示, 6种综合种养模式下的土壤种子库密度从53 050粒/m²到120 821粒/m²不等, 但各综合种养模式下的土壤杂草种子库均包含3类潜在杂草群落, 分别为稻田杂草、秋熟旱田杂草和夏熟旱

田杂草;其中稻田杂草种子的占比介于33.58%~62.97%之间,稻虾和稻蟹共作模式下稻田杂草种子在总种子库中的平均占比56.28%和54.47%显著高于其他4种共作模式(表1)。不同综合种养模式下地上杂草群落和土壤杂草种子库的Sørenson相似性和Bray-Curtis相异度存在一定差异,总体上,稻鸭共

作模式下地上显杂草群落和地下潜杂草群落(种子库)的Sørenson相似性和Bray-Curtis相异度最低(表1)。表明综合种养模式能显著改变田间杂草群落的组成,改变某些杂草在群落中的优势地位,同时影响土壤杂草种子库的密度和组成,从而影响杂草的发生危害程度。



a: 稻鸭; b: 稻虾; c: 稻蟹; d: 稻鱼; e: 稻鳖; f: 稻鳅/鳝。a: Rice-duck; b: rice-crayfish; c: rice-crab; d: rice-fish; e: rice-turtle; f: rice-loach/mud eel.

图4 不同稻田综合种养模式下土壤中不同类型杂草种子库密度随时间的变化

Fig. 4 Change of weed seedbank densities for three different weed types over time under different rice-aquaculture integrated cultivation modes

3 讨论

杂草群落组成的变化是农艺实践所施加选择压力的结果(Derksen et al., 2002; Owen, 2008)。杂草防除是通过物理、化学或生物的干扰来实现的,所有形式的干扰都施加选择压力,任何具有连续的、固定的选择压力的种植系统都将促进最适应的杂草种类或类型增长(Holt, 1994; Buhler, 1999)。农田杂草种子库对于杂草群落具有“记忆”的作用,特别是与一

年生杂草的发生有着密切关系(Buhler et al., 1997)。种子库中存留的杂草种子可以缓冲控草措施对杂草的选择压力,使杂草在次年仍能保持相当水平的发生量(Mayor & Dessaint, 1998)。因而土壤杂草种子库特征是决定未来田间杂草发生的根本性因素,是地上部杂草群落不断发生的根源。本研究结果显示,稻田杂草群落和土壤种子库的组成有较高的相似性,土壤种子库密度和地上杂草危害呈正相关,即水田杂草种子库的密度、种类组成及结构特征决定

非偏好杂草的结实量增加,回馈种子库的种子雨量增加,种子库密度上升,下季出苗增加。此外,通过综合种养稻田的水分管理,可造成不利于杂草萌发和生长的条件,直接减少杂草群落丰富度,从而减少种子雨的输入。因养殖对象的活动等需要,综合种养稻田一般会维持一段时间的深水层,但是不同杂草对水分的喜好和对深水的耐受程度不同,耐受程度高的杂草生长更好,有可能结实产生更多的种子雨输入种子库。因而,对于被偏好取食的杂草以及不适应深水条件的杂草,土壤种子库密度可能呈下降趋势,而非偏好的杂草以及适应深水条件的杂草,土壤种子库密度则可能呈上升趋势,种子库不同物种的组成比例逐渐发生变化。杂草种子库的输出途径包括萌发、死亡、动物取食和散播等,其中萌发和死亡是主要方式。当输入大于输出时种子库密度呈

上升趋势,当输出大于输入时种子库密度呈下降趋势(强胜,2009)。本研究发现长期实施同一种单一的综合种养模式后,稻田的杂草种子库密度和地上杂草群落综合草情优势度都经历了一个先降后升的过程,说明虽然由于不同的养殖对象对杂草的偏好作用不同,不同类型杂草在不同种养模式下的变化趋势也有所不同,但长期实施后,最终由于单一、固定的选择压力和杂草对压力的适应性,导致受选择压力大(不适应)的杂草种群密度减小、种子库密度下降;受选择压力小(适应)的杂草种群密度增大、种子库密度上升,逐渐成为绝对优势杂草种群,加快了杂草群落结构的演替,当种子库密度上升至50 000粒/m²以上时,稻田杂草综合草情优势度升高,杂草危害存在加剧的风险。

表1 不同综合种养模式下稻田土壤种子库中杂草种子占比和地上杂草群落与土壤杂草种子库相似性比较

Table 1 Proportion of rice weed in seedbank, the similarity to seed bank of weed community in rice fields under different rice-aquaculture integrated cultivation modes

综合种养模式 Rice-aquaculture integrated cultivation mode	稻田杂草种子平均占比 Proportion of rice weed in seedbank/%	稻田杂草群落和种子库相似性 Similarity of weed community and seed bank in rice field	
		Sørensen相似性 Sørensen similarity	Bray-Curtis相异度 Bray-Curtis dissimilarity
		稻鸭共作 Rice-duck co-cropping	46.38±4.72 b
稻虾共作 Rice-crayfish co-cropping	56.28±4.81 a	0.60±0.05 a	0.85±0.02 ab
稻蟹共作 Rice-crab co-cropping	54.47±2.97 a	0.58±0.04 a	0.86±0.02 ab
稻鱼共作 Rice-fish co-cropping	43.52±4.88 b	0.57±0.03 a	0.86±0.01 ab
稻鳖共作 Rice-turtle co-cropping	48.20±3.40 b	0.56±0.04 ab	0.85±0.01 b
稻鳅/鳝共作 Rice-loach/mud eel co-cropping	49.28±3.49 ab	0.61±0.04 a	0.88±0.01 a
常规稻田 Traditional rice field	42.18±6.51 b	0.42±0.09 b	0.87±0.04 ab

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SD. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

虽然稻田综合种养模式可以在一定程度上减轻水稻草害发生,但长期单一的综合种养模式并不能完全控制草害的发生。因此,为有效控制杂草危害,需要其他措施的相互配合,进一步提高种子库的输出,降低种子库的输入。在传统水稻种植模式下,化学除草是最主要的控草方式;而在综合种养稻田,化学除草剂施用将影响养殖对象在稻田中的生存及生长,因而其在综合种养稻田的应用受到限制。传统的综合种养模式下杂草的控制除养殖对象的活动外,一般主要依靠水层管理和人工拔除。人工拔除是主要的杂草防除补充手段,主要针对地上杂草群落,但是杂草人工拔除耗时大,成本高,会大大降低综合种养稻田的收益。将地上杂草群落和地下种子库共同作为防控目标,才能达到标本兼治的目的。同时进行多种控草组合技术对杂草施加的多样化选

择压力要大大低于单一重复的选择压力,有利于杂草的防控。Li et al. (2012)在实施稻鸭综合种养时,通过有效的水分管理等,配合冬季种植绿肥等措施,在连续9年的稻鸭共作后,土壤种子库总密度从初始的约110 000粒/m²下降至约10 000粒/m²,累计降幅90.73%,随之地上显杂草群落的密度降低,随着稻田杂草种子库密度下降和物种组成变化,地上显杂草群落的密度降低,并伴随着优势杂草种群改变,杂草的发生基数则从初始的169株/m²降低到15/m²,降幅达91.03%,有效控制了杂草危害;地上杂草种群的下降趋势及组成变化与土壤杂草种子库的变化基本一致,不过零星的稗危害仍然需要人工拔除(Li et al., 2012)。综合种养模式下,针对杂草发生的源头——土壤种子库(潜杂草群落),依据水分管理的要求以及杂草种子水流传播扩散的特点(Li &

Qiang, 2009), 采取控制随水流传播杂草种子的措施, 将进一步减少杂草种子雨对种子库的输入并增加种子库的输出, 利于杂草的防控。实践证明, 杂草的生态防控措施, 如清洁灌溉水源(截流)和主动移除田间的杂草种子(网捞), 可以有效降低杂草种子雨的输入并增加输出, 从而有效降低稻田土壤杂草种子库的密度, 减少杂草的发生基数, 从源头上降低杂草危害(Zhang et al., 2019; 2021)。在综合种养模式下, 杂草生态防控措施不影响养殖对象, 可以持续应用, 能有效提高杂草的防控效果, 具有很好的应用前景。

参 考 文 献 (References)

- Buhler DD. 1999. Expanding the context of weed management. *Journal of Crop Production*, 2(1): 1–7
- Buhler DD, Hartzler RG, Forcella F. 1997. Implications of weed seed-bank dynamics to weed management. *Weed Science*, 45(3): 329–336
- Chancellor RJ. 1979. A review of long-term effects of herbicides: the long-term effects of herbicides on weed populations. *Annals of Applied Biology*, 91: 141–144
- Cheng JA, Zhu ZR. 2017. Development of rice pest management in the past 60 years in China: problems and strategies. *Journal of Plant Protection*, 44(6): 885–895 (in Chinese) [程家安, 祝增荣. 2017. 中国水稻病虫害治理 60 年: 问题与对策. *植物保护学报*, 44(6): 885–895]
- Derksen DA, Anderson RL, Blackshaw RE, Maxwell B. 2002. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 94(2): 174
- Frei M, Becker K. 2005. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture. *Aquaculture*, 244(1/2/3/4): 119–128
- Holt JS. 1994. Impact of weed control on weeds: new problems and research needs. *Weed Technology*, 8(2): 400–402
- Huang DC, You MS, Hou YM, Li ZS. 2005. Effects of chemical herbicides on bio-communities in agroecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 25(6): 1451–1458 (in Chinese) [黄顶成, 尤民生, 侯有明, 李志胜. 2005. 化学除草剂对农田生物群落的影响. *生态学报*, 25(6): 1451–1458]
- Huang SW, Wang L, Liu LM, Fu Q, Zhu DF. 2014. Nonchemical pest control in China rice: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2): 275–291
- Jiang Y, Wang JP, Cao CG. 2020. Development of the integrated farming technology of rice and fish. *Crops*, (2): 200–204 (in Chinese) [江洋, 汪金平, 曹凑贵. 2020. 稻田种养绿色发展技术. *作物杂志*, (2): 200–204]
- Jiang YL, Hou GJ, Wang YJ, Zhang J, Wang SM, Chen HL. 2015. Study on the ecosystem construction and turtle farming technology in rice field. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 21(20): 94–95 (in Chinese) [蒋业林, 侯冠军, 王永杰, 张静, 王士梅, 陈红莲. 2015. 稻田养鳖生态系统构建与种养殖技术研究. *安徽农学通报*, 21(20): 94–95]
- Li RH, Qiang S. 2009. Composition of floating weed seeds in lowland rice fields in China and the effects of irrigation frequency and previous crops. *Weed Research*, 49(4): 417–427
- Li SS, Wei SH, Zuo RL, Wei JG, Qiang S. 2012. Changes in the weed seed bank over 9 consecutive years of rice-duck farming. *Crop Protection*, 37: 42–50
- Liu QK, Zhou PG, Zhu WD, Yang J, Yu YB, Liu MG, Jia PG, Xia LF, Xu LF, Li L. 2017. Weed control efficacy and economic benefits of rice-lobster farming in paddy rice fields. *Hubei Agricultural Sciences*, 56(10): 1859–1862 (in Chinese) [刘全科, 周普国, 朱文达, 杨峻, 喻永冰, 刘美刚, 贾平安, 夏良付, 许凌风, 李林. 2017. 稻虾共作模式对稻田杂草的控制效果及其经济效益. *湖北农业科学*, 56(10): 1859–1862]
- Lu JB, Li X. 2006. Review of rice-fish-farming systems in China: one of the Globally Important Ingenious Agricultural Heritage Systems (GIAHS). *Aquaculture*, 260(1/2/3/4): 106–113
- Lü DF, Wang W, Ma XZ, Wang Q, Wang A, Chen ZZ, Tang SQ. 2011. Ecological prevention and control of weeds in rice-crab polycultured field. *Hubei Agricultural Sciences*, 50(8): 1574–1578 (in Chinese) [吕东锋, 王武, 马旭洲, 汪清, 王昂, 陈再忠, 唐士桥. 2011. 稻蟹共生对稻田杂草的生态防控试验研究. *湖北农业科学*, 50(8): 1574–1578]
- Mayor JP, Dessaint F. 1998. Influence of weed management strategies on soil seedbank diversity. *Weed Research*, 38(2): 95–105
- Meng SL, Hu GD, Li DD, Qiu LP, Song C, Fan LM, Zheng Y, Wu W, Chen JZ, Bing XW. 2018. Research progress of the integrated farming of rice and fish. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 34(2): 146–152 (in Chinese) [孟顺龙, 胡庚东, 李丹丹, 裘丽萍, 宋超, 范立民, 郑尧, 吴伟, 陈家长, 邴旭文. 2018. 稻渔综合种养技术研究进展. *中国农学通报*, 34(2): 146–152]
- Michael PJ, Steadman KJ, Plummer JA. 2006. Climatic regulation of seed dormancy and emergence of diverse *Malva parviflora* populations from a Mediterranean-type environment. *Seed Science Research*, 16(4): 273–281
- Owen MD. 2008. Weed species shifts in glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, 64(4): 377–387
- Qiang S. 2009. *Weed science*. Beijing: Chinese Agriculture Press (in Chinese) [强胜. 2009. 杂草学. 北京: 中国农业出版社]
- Shu ZL, Chu GL, Miao K, Ji MX, Fu FS, Liu YB, Shen XK. 2004. Effects of rice-duck-duckweed farming system on controlling diseases, pests and weeds and increasing yield. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 32(6): 72–75 (in Chinese) [束兆林, 储国良, 缪康, 吉沐祥, 付反生, 刘亚柏, 沈晓昆. 2004. 稻-鸭-萍共作对水稻田病虫害的控制效果及增产效应. *江苏农业科学*, 32(6): 72–75]
- Sun GJ, Jiang LZ, Jiang XC, Li FH, Dong B, Ji M, Zhu MF, Xu SY. 2008. Biological control of rice-duck farming system on rice planthopper and weeds. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, (3): 76–78, 81 (in Chinese) [孙国俊, 蒋林忠, 蒋小春, 李

- 粉华, 董波, 季敏, 朱明发, 徐素雅. 2008. 稻鸭共作对稻田飞虱和杂草的生物控制试验研究. 现代农业科技, (3): 76-78, 81]
- Wang QS, Wang XY, Hang YH, Liu XX, Li PH. 2019. Combination modes and ecological effects of planting-breeding ecosystem in rice field. Chinese Agricultural Science Bulletin, 35(8): 46-51 (in Chinese) [王强盛, 王晓莹, 杭玉浩, 刘晓雪, 李培花. 2019. 稻田综合种养结合模式及生态效应. 中国农学通报, 35(8): 46-51]
- Wei SH, Qiang S, Ma B, Wei JG. 2005. Soil weed seedbank and integrated weed management. Soils, 37(2): 121-128 (in Chinese) [魏守辉, 强胜, 马波, 韦继光. 2005. 土壤杂草种子库与杂草综合管理. 土壤, 37(2): 121-128]
- Wei SH, Qiang S, Ma B, Wei JG, Chen JW, Wu JQ, Xie TZ, Shen XK. 2006. Influence of long-term rice-duck farming systems on the composition and diversity of weed communities in paddy fields. Journal of Plant Ecology, 30(1): 9-16 (in Chinese) [魏守辉, 强胜, 马波, 韦继光, 陈建卫, 吴建强, 谢桐洲, 沈晓昆. 2006. 长期稻鸭共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响. 植物生态学报, 30(1): 9-16]
- Wei SH, Yang J, Zhu WD, Jia PG, Zhang J, Fu JA, Li L. 2013. Weed control efficacy and economic benefits of rice-duck farming in paddy rice fields. Hubei Agricultural Sciences, 52(9): 2053-2056 (in Chinese) [魏守辉, 杨峻, 朱文达, 贾平安, 张佳, 符家安, 李林. 2013. 稻鸭共作对稻田杂草的控制效果及其经济效益. 湖北农业科学, 52(9): 2053-2056]
- Xu DB, Jia PG, Peng CL, Si GH, Xu XY, Yuan JF, Jiang DM. 2015. Investigation of weed growth and community diversity in the rice-crayfish symbiosis farming. Hubei Agricultural Sciences, 54(22): 5599-5602 (in Chinese) [徐大兵, 贾平安, 彭成林, 倡国涵, 徐祥玉, 袁家富, 蒋代铭. 2015. 稻虾共作模式下稻田杂草生长和群落多样性的调查. 湖北农业科学, 54(22): 5599-5602]
- Xu HX, Zheng XS, Tian JC, Lai FX, He JC, Lü ZX. 2017. Advances in the development and application of control technologies for insect pest management in paddy fields in China. Journal of Plant Protection, 44(6): 925-939 (in Chinese) [徐红星, 郑许松, 田俊策, 赖凤香, 何佳春, 吕仲贤. 2017. 我国水稻害虫绿色防控技术的研究进展与应用现状. 植物保护学报, 44(6): 925-939]
- Yuan Q, Lü WW, Huang WW, Sun XL, Lü WG, Zhou WZ. 2020. Effects of different fertilization rates on the growth of loach and rice yield in rice-loach culture system. Acta Agriculturae Shanghai, 36(5): 17-22 (in Chinese) [袁泉, 吕巍巍, 黄伟伟, 孙小淋, 吕卫光, 周文宗. 2020. 稻鳅共作模式下不同施肥量对泥鳅生长和水稻产量的影响. 上海农业学报, 36(5): 17-22]
- Yuan WL, Cao CG, Wang JP, Cai ML, Wang CF. 2010. The community structure and diversity of phytoplankton in rice-fish ecological system. Acta Ecologica Sinica, 30(1): 253-257 (in Chinese) [袁伟玲, 曹凑贵, 汪金平, 蔡明历, 王昌付. 2010. 稻鱼共作生态系统浮游植物群落结构和生物多样性. 生态学报, 30(1): 253-257]
- Zhang J, Hu LL, Ren WZ, Guo L, Wu MF, Tang JJ, Chen X. 2017. Effects of fish on field resource utilization and rice growth in rice-fish coculture. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(1): 299-307 (in Chinese) [张剑, 胡亮亮, 任伟征, 郭梁, 吴敏芳, 唐建军, 陈欣. 2017. 稻鱼系统中田鱼对资源的利用及对水稻生长的影响. 应用生态学报, 28(1): 299-307]
- Zhang W. 2011. Causes of herbicide resistance weed and its management strategies. Heilongjiang Agricultural Sciences, (5): 52-54 (in Chinese) [张武. 2011. 抗药性杂草产生原因及治理策略. 黑龙江农业科学, (5): 52-54]
- Zhang Z, Li RH, Wang DH, Valverde BE, Qiang S. 2019. Floating dynamics of *Beckmannia syzigachne* seed dispersal via irrigation water in a rice field. Agriculture, Ecosystems & Environment, 277: 36-43
- Zhang Z, Li RH, Zhao C, Qiang S. 2021. Reduction in weed infestation through integrated depletion of the weed seed bank in a rice-wheat cropping system. Agronomy for Sustainable Development, 41(1): 1-14
- Zhao C, Dai WM, Li SS, Wei SH, Wei JG, Zhang CB, Qiang S. 2014. Change in weed seed bank diversity over 13 consecutive years of rice-duck and straw returning farming system in the rice-wheat rotated wheat fields. Biodiversity Science, 22(3): 366-374 (in Chinese) [赵灿, 戴伟民, 李淑顺, 魏守辉, 韦继光, 章超斌, 强胜. 2014. 连续13年稻鸭共作兼秸秆还田的稻麦连作麦田杂草种子库物种多样性变化. 生物多样性, 22(3): 366-374]

(责任编辑:李美娟)