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

浮萍覆盖对稻田杂草群落组成及多样性的影响

王丰，赖彦岑，唐宗翔，郑敏敏，史俊，顾麦云，沈健英，曹林奎，沙之敏

引用本文:
王丰, 赖彦岑, 唐宗翔, 等. 浮萍覆盖对稻田杂草群落组成及多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 672–682.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200581

(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

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

稻蟹共作与常规稻田蜘蛛群落组成及多样性分析

The structure of spider communities in crab paddies and conventional paddies

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1157–1162 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181068

稻虾共作对稻田土壤nirK反硝化微生物群落结构和多样性的影响

Effects of integrated rice–crayfish farming system on community structure and diversity of nirK denitrification microbe in paddy soils

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1324–1332 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171165

长期施肥对红壤双季稻冬闲田春季杂草群落的影响

Effects of long–term fertilization on spring season weed community in winter fallow paddy field in red soil area under double–rice cropping system

中国生态农业学报. 2015(9): 1150–1157 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150351

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 4 月 第 29 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2021, 29(4): 672−682

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200581

王丰, 赖彦岑, 唐宗翔, 郑敏敏, 史俊, 顾麦云, 沈健英, 曹林奎, 沙之敏. 浮萍覆盖对稻田杂草群落组成及多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 672−682

WANG F, LAI Y C, TANG Z X, ZHENG M M, SHI J, GU M Y, SHEN J Y, CAO L K, SHA Z M. Effects of duckweed mulching on composition and diversity of weed communities in paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 672−682

浮萍覆盖对稻田杂草群落组成及多样性的影响*

王 丰[1], 赖彦岑[1], 唐宗翔[1], 郑敏敏[1], 史 俊[2], 顾麦云[3], 沈健英[1], 曹林奎[1], 沙之敏[1**]

(1. 上海交通大学农业与生物学院 上海 200240; 2. 宁波市农业科学研究院 宁波 315040; 3. 上海自在青西农业发展有限公司 上海 201799)

摘 要: 在农业可持续发展的背景下, 稻田杂草防控需要兼顾生物多样性的保护。为了解浮萍覆盖对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响, 运用群落生态学的方法, 研究了多根紫萍覆盖(SP)、少根紫萍覆盖(LP)和不投放浮萍(CK)3 种处理下稻田杂草发生量和群落多样性在水稻 4 个生育期(分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期)的动态变化, 并对水稻产量进行分析。结果表明: SP 和 LP 处理在前两生育期分别比 CK 显著降低杂草密度 60.3%~75.8%和 81.1%~90.4%, 在整个水稻生育期能分别降低杂草鲜重生物量 48.0%以上和 81.3%以上, 杂草群落中阔叶类杂草比例明显下降。不同处理下, 稻田最主要杂草类别均是莎草科杂草; 不同处理的杂草群落中重要杂草的种类和相对重要程度都有较大差异, SP 和 LP 处理重要值较高的杂草均为莎草科的萤蔺和碎米莎草, CK 处理重要值较高的杂草则为阔叶类的鸭舌草; 在多数生育期, 两种浮萍覆盖下的杂草群落的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均与 CK 无显著差异。SP 和 LP 处理水稻的每穗粒数和穗重均有不同程度显著提高, SP 处理的水稻产量显著提高 28.0%。综合上述分析, 稻田投放初始覆盖面积 70.0%的多根紫萍和少根紫萍都能在降低稻田杂草密度和生物量的同时维持杂草群落的多样性, 且多根紫萍覆盖能促进水稻产量增长, 对保护稻田生物多样性和促进农业可持续发展有重要意义。

关键词: 可持续农业; 稻田; 浮萍覆盖; 杂草防控; 群落结构; 生物多样性

中图分类号: S451.1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of duckweed mulching on composition and diversity of weed communities in paddy fields*

WANG Feng[1], LAI Yancen[1], TANG Zongxiang[1], ZHENG Minmin[1], SHI Jun[2], GU Maiyun[3], SHEN Jianying[1], CAO Linkui[1], SHA Zhimin[1**]

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315040, China; 3. Shanghai Zizaiqingxi Agricultural Development Co., LTD, Shanghai 201799, China)

Abstract: Weed control and biodiversity conservation are both required for sustainable agricultural production. As duckweeds are capable of colonizing open water surfaces in several days on account of their extremely rapid growth rate, introduction of

* 上海市科技兴农推广项目[沪农科推字(2018)第 4-7 号]和国家重点研发计划课题(2016YFD08011106)资助

** 通信作者: 沙之敏, 主要研究方向为植物营养与农业面源污染防控。E-mail: zhiminsha@sjtu.edu.cn
王丰, 主要研究方向为植物营养与农田杂草控制。E-mail: wangfeng123@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-07-18 接受日期: 2020-10-25

* This study was supported by Shanghai Science and Technology Promotion Project [(2018) No. 4-7] and the National Key Research and Development Program of China (2016YFD08011106).

** Corresponding author, E-mail: zhiminsha@sjtu.edu.cn

Received Jul. 18, 2020; accepted Oct. 25, 2020

duckweeds to paddy field is considered to inhibit weed growth as a result of shading. To acquire evidence for the utility of duckweed to control weeds and the impact on weed community composition in paddy fields, a field experiment was conducted for a rice-growing seasons. Using community ecology methods, we investigated dynamic changes of weed quantity and community diversity at 4 rice growth stages (tillering stage, booting stage, flowering stage, and maturing stage) and rice grain traits at maturing stage under three treatments: rice grown with *Spirodela polyrrhiza* mulching (SP), rice grown with *Landoltia punctata* mulching (LP), and rice grown without duckweed mulching (CK). (*Landoltia punctata* and *Spirodela polyrrhiza* were introduced into the respective plots with about 70% floodwater coverage on the day of rice transplantation.) The results showed that: ten species from seven families were recorded in weed surveys. Both duckweed species significantly suppressed weed emergence. SP and LP significantly reduced weed density by 60.3%−75.8% and 81.1%−90.4%, respectively, in the first two stages; and reduced weed biomass by more than 48.0% and 81.3%, respectively, throughout the rice-growing season. Both duckweed species changed the composition of weed communities. Cyperaceae weeds were predominant in the weed communities of the SP and LP treatments. Biomass proportions of Cyperaceae weeds were more than 62.9% and 60.2% in the weed communities of the SP and LP treatments, respectively; while the proportions of broadleaf weeds decreased significantly. Cyperaceae weeds *Scirpus juncoides* and *Cyperus iria* showed higher important values in the weed communities of the SP and LP treatments. In the weed communities of the CK, broadleaf weeds *Monochoria vaginalis* showed the highest important values. The Bray-Curtis similarity indice between weed communities of CK and duckweed mulching treatments was less than 0.25. Correspondingly, the weed communities of CK were separated from the weed communities of duckweed mulching treatments in UPGMA clustering. Duckweed mulching showed no negative impact on plant diversity and rice grain yields. In most rice growth stages, the Margalef index, Shannon-Wiener index, and Simpson index of weed communities under three treatments were not different significantly. Due to the mitigation of weed competition and the potential nutrients supplied by decomposition of duckweed, SP and LP significantly improved grain number per panicle by 33.7% and 15.8%, respectively, and panicle weight by 28.2% and 17.0%, respectively. Rice grain yield in the SP treatment significantly increased by 28.0%. In summary, duckweed mulching reduced weed density and biomass and altered weed community composition while maintained weed diversity in paddy fields, and *Spirodela polyrrhiza* mulching improved rice yield. The results demonstrated that duckweed introduction to paddy fields is an effective and eco-friendly weed management strategy which is conducive to biodiversity conservation and sustainable agricultural development.

Keywords: Sustainable agriculture; Paddy field; Duckweed mulching; Weed control; Community structure; Biodiversity

杂草是稻田生态系统的重要组成部分，一方面杂草与水稻(*Oryza sativa*)争夺光照、养分、水分和生存空间[1]，影响水稻的产量与质量，是稻田生态系统生产力的重要制约因素之一[2-3]。另一方面杂草是具有潜在利用价值的植物资源[4]，也是稻田植物多样性的主要组成部分，在维护稻田生态平衡方面起着关键作用[5-6]。稻田杂草的科学防除问题一直是农业专家学者们研究的热点之一[7]。自 20 世纪下半叶，作为绿色革命重要标志之一的化学除草剂大量投入农田，在保障全球粮食生产安全的同时，也带来了严重的杂草抗药性问题和农田环境污染问题[8-9]，并使杂草物种丰富度和野生植物遗传多样性受到严重影响[10]。目前，全球范围内已发现 152 种双子叶抗性杂草和 110 种单子叶抗性杂草[11]，稻田杂草群落正由一年生易除杂草群落逐渐向多年生恶性杂草及耐药性杂草群落方向发展[12]。根据水稻-杂草系统的耗散结构理论，只要在杂草生物量低于一定竞争临界值时，系统就将形成水稻占据优势的高层次有序平衡态[13]。因此，稻田杂草问题不能依靠盲目过量地使用除草剂来解决，需要提出生态的杂草管理策略，在把杂草密度制约在一定的阈值范围内的同时，保持一定的杂草的生物多样性[14]。

浮萍科(Lemnaceae)是常见于水田、沟渠、池塘等静水环境中的漂浮小草本，具有极强的繁殖力和适应能力[15]，是一类应用前景广阔的生物资源[16]。长期的水稻生产实践中，人们总结出了利用浮萍防治稻田杂草的手段。浮萍的生长速度极快，通常在条件适宜时以指数形式增长[17]，能在短时间内覆盖开阔水面，减少进入水面的光照[18]。已有研究认为浮萍的覆盖作用能抑制迟发、矮小的杂草如鸭舌草(*Monochoria vaginalis*)、牛毛毡(*Heleocharis yokoscensis*)、矮慈姑(*Sagittaria pygmaea*)等的萌发和生长[19]。而有关浮萍覆盖影响稻田杂草群落组成及多样性的研究仍较匮乏，因此，本文以上海市青浦区两种常见的浮萍为例，研究了在水稻不同生育期浮萍覆盖对稻田杂草群落组成及多样性的影响，以期在农业可持续发展的背景下，为稻田杂草管理和生物多样性的保护提供可行的解决办法。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

该试验于 2019 年在上海市青浦现代农业园区

(30°58′9″E, 121°0′34″N)进行，青浦区属于亚热带海洋性季风气候，单季稻区，年降雨量 1280.6 mm，平均温度 17.5 ℃，年平均日照 1846.3 h。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理：多根紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)覆盖(SP)、少根紫萍(*Landoltia punctata*)覆盖(LP)和不投放浮萍对照(CK)。水稻品种为‘青角 307’，浮萍均采集于青浦区试验点附近的池塘和沟渠中，在移栽当天(6 月 15 日)投放，初始覆盖面积比 70%左右，并在出水口使用孔径为 2 mm 的尼龙网拦截。试验区前茬种植紫云英(*Astragalus sinicus*)，水稻季前还田用作绿肥。不施用除草剂，所用肥料是含氮量为 4.5%的绿先机牌有机肥，总施氮量为 189.2 kg·hm^{-2}，分基肥 113.5 kg·hm^{-2} (5 月 15 日)和追肥 75.7 kg·hm^{-2} (7 月 4 日)两次施入。试验田根据处理设置面积均为 0.33 hm^2 的 3 个区域，每个区各按“五点取样”设置 5 个 2 m×2 m 的调查区(距离边界 2 m 以上以避免边缘效应)。分别于水稻的分蘖期(7 月 17 日)、孕穗期(8 月 18 日)、扬花期(9 月 14 日)和成熟期(11 月 1 日)进行 4 次杂草调查，每次调查取样 0.33 m×0.33 m 范围内的所有杂草，4 次取样点分别位于调查区不同 1/4 部分的中心(图 1)，记录杂草的种类、数量、株高和整株鲜重等。水稻成熟期时取样测产，每个调查区附近取样 1 m×1 m 范围内的水稻，测定水稻有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重、穗长和穗重等。水稻产量计算公式如下：

$$产量(t\cdot hm^{-2})=有效穗数(m^{-2})\times每穗粒数\times结实率(\%)\times千粒重(g)\times10^{-7} \quad (1)$$

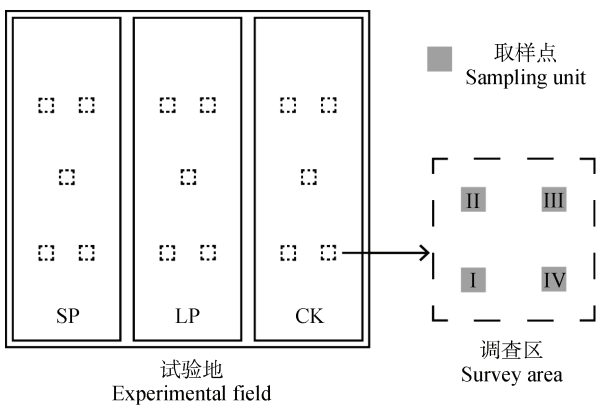

图 1 试验地及调查区的示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental field and survey areas

1.3 数据统计与分析

根据各样方内杂草的种类、株(分蘖)数、株高和鲜重等数据，计算出各种杂草的密度、生物量(鲜重)和重要值。杂草重要值能够反映杂草的相对优势程度，重要值≥10%的杂草被认为是重要杂草。利用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数等描述物种多样性的程度。基于杂草重要值数据计算 Bray-Curtis 相似指数用于群落相似性分析，相似指数越大表示群落间的相似程度越高，并进行基于 Bray-Curtis 距离的 UPGMA 聚类分析。各计算公式如下：

$$杂草重要值: IV=(RD+RF+RH+RW)/4\times100\% \quad (2)$$

$$Margalef丰富度指数: H=(S-1)/\ln N \quad (3)$$

$$Shannon\text{-}Wiener多样性指数: H'=-\sum(Pi\times\ln Pi) \quad (4)$$

$$Simpson优势度指数: D=\sum Pi^2 \quad (5)$$

$$Bray\text{-}Curtis\ 相似指数: B=2\sum\min(IV_{a,i},\ IV_{b,i})/\sum(IV_{a,i}+IV_{b,i}) \quad (6)$$

式中：RD、RF、RH 和 RW 分别为杂草的相对密度、相对频度、相对高度和相对鲜重，均为每种杂草的数值占该处理所有杂草总和的比例；S 为群落杂草物种个数；N 为群落杂草数量；$Pi=ni/N$，ni 为群落中第 i 种杂草的数量；$IV_{a,i}$ 和 $IV_{b,i}$ 分别为相比较的两群落中第 i 种杂草的重要值。

使用 Microsoft Excel 2016 和 R3.6.1 软件进行数据分析处理，使用 vegan 程序包计算群落多样性指数和相似性指数，采用 LSD 法进行处理间的显著性差异分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 浮萍覆盖对稻田杂草种类、密度和鲜重的影响

通过对不同处理的稻田杂草群落进行调查，共计调查到 7 科 10 属 10 种杂草(表 1)，包括禾本科杂草：稗(*Echinochloa crus-galli*)、千金子(*Leptochloa chinensis*)和双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)；莎草科杂草：碎米莎草(*Cyperus iria*)和萤蔺(*Scirpus juncoides*)；阔叶类杂草：喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、紫云英(*Astragalus sinicus*)、水鳖(*Hydrocharis dubia*)、苹(*Marsilea quadrifolia*)和鸭舌草。两种浮萍覆盖对不同时期稻田杂草群落的种类组成有明显影响。在所调查 4 个时期的杂草群落中，SP 和 LP 中出现次数较多的杂草均有萤蔺、碎米莎草和喜旱莲子草，而 CK 则是苹、鸭舌草和碎米莎草。两种浮萍覆盖下的杂草群落中，杂草种类数均一直维持在 3~5 种，而 CK 则一直处于上升趋势(2~6 种)。综合所有时期，CK 中出现的杂草种类最多，共 9 种杂草，SP 和 LP 中分别出现 8 种和 6 种杂草。

表 1　不同处理下水稻不同生育期稻田杂草发生情况

Table 1　Occurrence of weed species in paddy fields at different rice growth stages under different treatments

科 Family	属 Genus	种 Species	SP				LP				CK			
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
禾本科 Gramineae	稗属 *Echinochloa*	稗 *Echinochloa crus-galli*	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+	+
	千金子属 *Leptochloa*	千金子 *Leptochloa chinensis*	+	−	−	−	+	−	−	−	−	−	−	−
	雀稗属 *Paspalum*	双穗雀稗 *Paspalum paspaloides*	−	+	+	−	−	+	−	+	−	−	−	+
莎草科 Cyperaceae	莎草属 *Cyperus*	碎米莎草 *Cyperus iria*	−	+	+	+	+	−	+	+	−	+	+	+
	藨草属 *Scirpus*	萤蔺 *Scirpus juncoides*	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	−
苋科 Amaranthaceae	莲子草属 *Alternanthera*	喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides*	+	+	+	−	−	+	+	+	−	+	−	+
豆科 Leguminosae	黄耆属 *Astragalus*	紫云英 *Astragalus sinicus*	−	−	−	+	−	−	−	+	−	−	−	−
水鳖科 Hydrocharitaceae	水鳖属 *Hydrocharis*	水鳖 *Hydrocharis dubia*	−	−	+	−	−	−	−	−	−	−	−	−
苹科 Marsileaceae	苹属 *Marsilea*	苹 *Marsilea quadrifolia*	−	−	−	−	−	−	−	−	+	+	+	+
雨久花科 Pontederiaceae	雨久花属 *Monochoria*	鸭舌草 *Monochoria vaginalis*	+	−	−	−	−	−	−	−	+	+	+	+

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。＋表示杂草发生，－表示杂草不发生。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice. ＋ indicates weeds occurred. － indicates weeds did not occur.

两种浮萍覆盖均能在一定程度上降低稻田杂草发生的数量(图 2)。在分蘖期和孕穗期，SP 和 LP 的杂草密度比 CK 分别显著降低 60.3%~75.8%和 81.1%~90.4%；在扬花期，SP 的杂草密度比 CK 显著降低 45.9%。不同处理下杂草密度的变化趋势不尽相同，SP 和 CK 的杂草密度在水稻不同生育期没有显著变化，而LP的杂草密度在后两个生育期比前两生育期显著上升，在成熟期由于阔叶类杂草数量的明显上升，LP 的杂草密度为 4 个时期所有处理的最大值，达 221.4 株·m^{-2}。两种浮萍覆盖对稻田杂草生

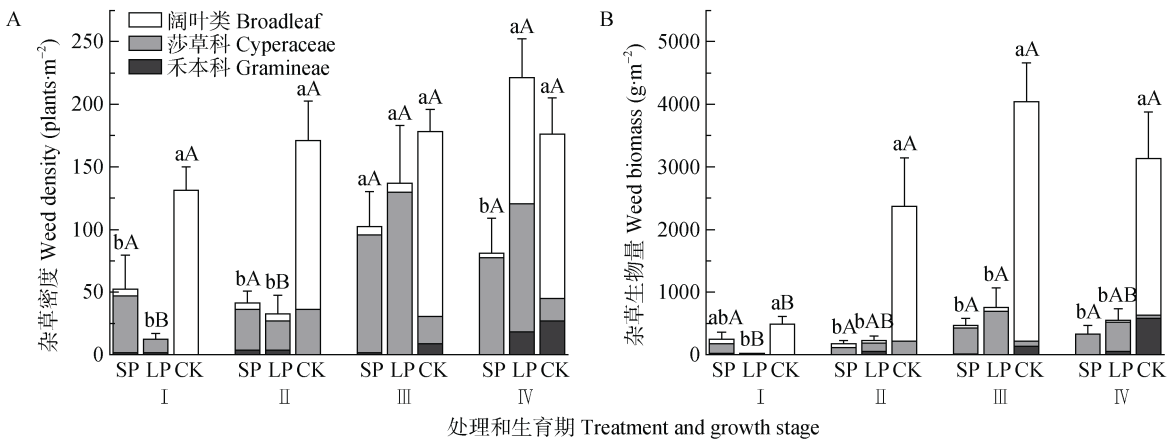

图 2　不同处理下水稻不同生育期各类稻田杂草的密度(A)和生物量(B)

Fig. 2　Densities (A) and biomasses (B) of different categories of weeds in paddy fields at different growth stages of rice under different treatments

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。不同小写字母表示同一水稻生育期不同处理间差异显著(P<0.05)，不同大写字母表示同一处理水稻不同生育期间差异显著(P<0.05)。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice. Different lowercase letters at the same rice growth stage show significant differences among treatments at P<0.05 level. Different capital letters in the same treatment show significant differences among rice growth stages at P<0.05 level.

物量的抑制效果明显(图 2)。除分蘖期的 SP，在整个水稻生育期两种浮萍覆盖处理比 CK 均能显著降低 81%以上的杂草生物量。不同处理下杂草生物量的变化趋势不尽相同，从整个水稻生育期来看，LP 和 CK 的杂草生物量大致呈上升趋势，而 SP 没有产生明显变化，扬花期 CK 的杂草生物量达 4037.2 $g \cdot m^{-2}$，是所有处理的最大值。

浮萍覆盖对稻田杂草群落中的主要杂草类别有重要影响。根据 SP 处理不同类别杂草的密度比例和生物量比例，可将其杂草群落组成概括为“莎草科杂草+阔叶类杂草+禾本科杂草”，其莎草科杂草的密度比例和生物量比例始终高于 78.3%和 62.9%，且高于其他两类杂草，且从生物量的角度，莎草科的比例一直处于上升趋势。LP 的最主要杂草类别也是莎草科杂草，密度比例和生物量比例始终分别高于 46.3%和 60.2%，综合 4 个时期的平均值，阔叶类杂草的密度和生物量大于禾本科杂草。CK 的最主要杂草类别则是阔叶类杂草，密度比例和生物量比例始终分别高于 74.5%和 79.9%，其中分蘖期的 CK 杂草群落中全为阔叶类杂草，从孕穗期到成熟期，CK 的莎草科杂草比例逐渐下降，而禾本科杂草比例逐渐上升。

2.2 浮萍覆盖对稻田杂草重要值的影响

与 CK 相比，两种浮萍覆盖下重要杂草的种类和相对重要程度都有较大改变(图 3)。综合整个水稻生育期，SP 和 LP 的重要杂草物种数都多于 CK。SP 的重要杂草主要有双穗雀稗(孕穗期)、碎米莎草(孕穗期—成熟期)、萤蔺(分蘖期—成熟期)、喜旱莲子草(分蘖期—扬花期)和千金子(分蘖期)等 5 种，其重要值分别为 13.3%、13.3%~48.5%、46.4%~58.1%、11.4%~21.0%和 14.3%。LP 的重要杂草主要有千金子(分蘖期)、双穗雀稗(孕穗期、成熟期)、碎米莎草(分蘖期、扬花期、成熟期)、萤蔺(分蘖期—成熟期)、喜旱莲子草(孕穗期、扬花期)和紫云英(成熟期)等 6 种，其重要值分别为 20.2%、12.1%~21.6%、17.4%~47.1%、35.4%~62.4%、12.9%~20.2%和 20.3%。CK 的重要杂草主要有稗(扬花期、成熟期)、碎米莎草(孕穗期—成熟期)、苄(分蘖期、孕穗期)和鸭舌草(分蘖期—成熟期)等 4 种，其重要值分别为 11.0%~16.7%、13.6%~24.5%、13.2%~21.0%和 45.9%~79.0%。

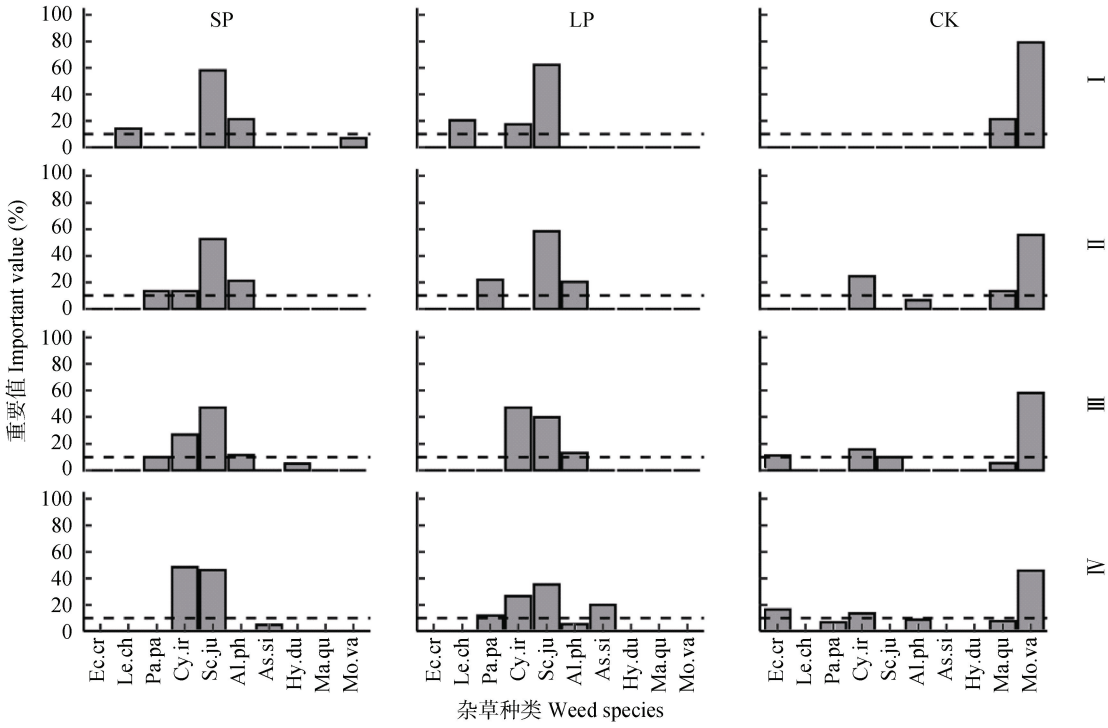

图 3 不同处理下水稻不同生育期各种稻田杂草的重要值

Fig. 3 Important values of weed species in paddy fields at different growth stages of rice under different treatments

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。Ec.cr、Le.ch、Pa.pa、Cy.ir、Sc.ju、Al.ph、As.si、Hy.du、Ma.qu 和 Mo.va 分别表示稗、千金子、双穗雀稗、碎米莎草、萤蔺、喜旱莲子草、紫云英、水鳖、苄和鸭舌草。虚线以上为重要杂草。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice. Ec.cr, Le.ch, Pa.pa, Cy.ir, Sc.ju, Al.ph, As.si, Hy.du, Ma.qu and Mo.va indicate *Echinochloa crus-galli*, *Leptochloa chinensis*, *Paspalum paspaloides*, *Cyperus iria*, *Scirpus juncoides*, *Alternanthera philoxeroides*, *Astragalus sinicus*, *Hydrocharis dubia*, *Marsilea quadrifolia* and *Monochoria vaginalis*. Above the dashed line are important weeds.

从重要杂草在各处理中的重要值随水稻生育期的变化来看, SP 在前 3 个生育期重要值最高的杂草是萤蔺(47.2%~58.1%), 但萤蔺的重要值随水稻生育时期逐渐减小, 碎米莎草的重要值则明显增大, 至成熟期碎米莎草(48.5%)成为 SP 重要值最高的杂草。LP 除扬花期重要值最高的杂草是碎米莎草(47.1%)外, 其余时期重要值最高的杂草均是萤蔺(35.4%~62.4%), 萤蔺的重要值一直减小, 而碎米莎草在扬花期和成熟期的重要值高于前两个时期。CK 中鸭舌草(45.9%~79.0%)一直是重要值最高的杂草, 重要值不断减小。

2.3　浮萍覆盖对稻田杂草群落多样性的影响

通过对比同一时期不同处理杂草群落的多样性指数, 可以发现除成熟期的 SP 与 CK 相比, 显著降低了杂草群落的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数, 并显著增加了 Simpson 优势度指数, 其他各时期的 SP 和 LP 杂草群落多样性指数与 CK 均无显著差异(图 4)。因此, 浮萍覆盖基本维持了稻田杂草群落的生物多样性。各处理杂草群落的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数随水稻生育时期的变化趋势不尽相同。Margalef 丰富度指数反映杂草群落中的物种丰富程度, 在整个水稻生育期, SP 和 LP 杂草群落的 Margalef 丰富度指数没有显著变化, 而 CK 呈现上升趋势。Shannon-Wiener 多样性指数反映杂草群落的复杂程度, 在整个水稻生育期, SP 杂草群落的 Shannon-Wiener 多样性指数没有显著变化, 而 LP 和 CK 呈现上升趋势。Simpson 优势度指数反映杂草群落中的优势物种的优势程度, 在整个水稻生育期, SP 和 LP 杂草群落的 Simpson 优势度指数没有显著变化, 而 CK 呈现降低趋势。

2.4　稻田杂草群落相似性分析

由不同水稻生育期各处理杂草群落间的群落相似性指数可知(表 2), 同一生育期的 CK 和 SP、LP 的杂草群落相似性指数较低, 分别小于 0.25 和 0.26, 而同一生育期的 SP 和 LP 之间的群落相似性指数较高(0.67~0.86)。同一处理不同一生育期的杂草群落间群落相似性指数较高, SP 为 0.46~0.82、LP 为 0.53~0.68, CK 为 0.54~0.77, 且基本呈现出时期越接近, 群落相似性指数越高的规律。

水稻不同生育期各处理杂草群落基于 Bray-Curtis 距离的 UPGMA 聚类分析(图 5)显示, SP 和 LP 在扬花期、成熟期的杂草群落先被聚为了一类, 其群落相似性指数为 0.67~0.87。同样, 它们在分蘖期、孕穗期的杂草群落也被聚为了一类, 群落相似性指数为 0.66~0.86。结合图 3 中不同生育期 SP 和 LP 中

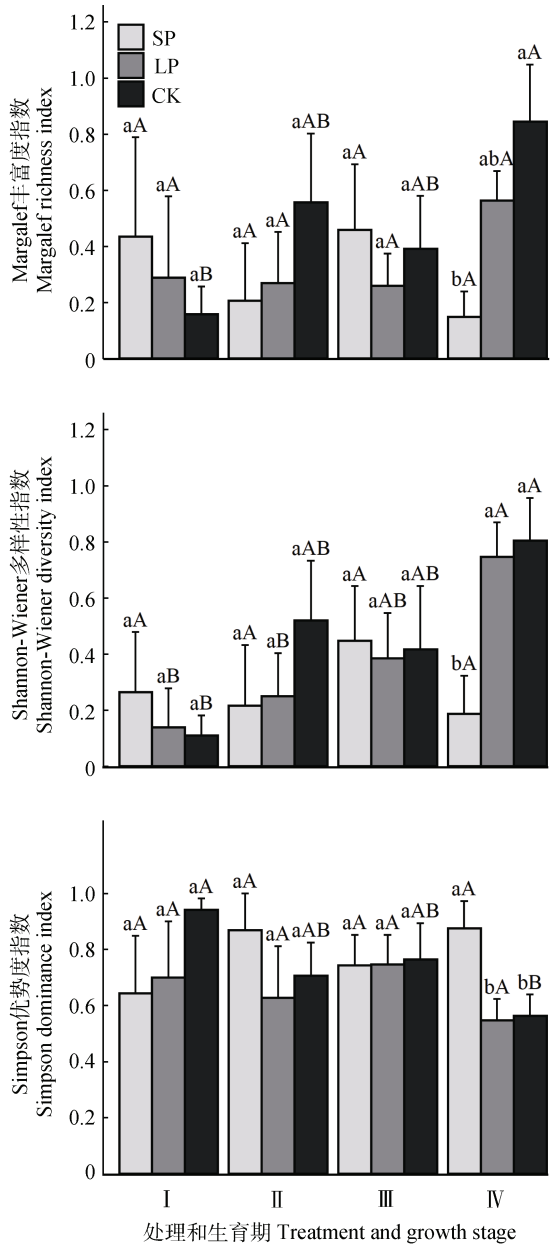

图 4　不同处理下水稻不同生育期稻田杂草群落的多样性指数

Fig. 4　Diversity indices of weed communities in paddy fields at different growth stages of rice under different treatments

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻生育期的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。不同小写字母表示同一水稻生育期不同处理间差异显著(P<0.05), 不同大写字母表示同一处理水稻不同生育期间差异显著(P<0.05)。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice. Different lowercase letters at the same rice growth stage show significant differences among treatments at P<0.05 level. Different capital letters in the same treatment show significant differences among rice growth stages at P<0.05 level.

表 2 不同处理下水稻不同生育期稻田杂草群落间的 Bray-Curtis 相似性指数

Table 2 Bray-Curtis similarity indices among weed communities in paddy fields at different growth stages of rice under different treatments

水稻生育时期 Rice growth stage	处理 Treatment	Ⅰ			Ⅱ			Ⅲ			Ⅳ	
		SP	LP	CK	SP	LP	CK	SP	LP	CK	SP	LP
Ⅰ	LP	0.72										
	CK	0.07	0.00									
Ⅱ	SP	0.73	0.66	0.00								
	LP	0.78	0.58	0.00	0.86							
	CK	0.13	0.17	0.69	0.20	0.06						
Ⅲ	SP	0.59	0.65	0.00	0.82	0.68	0.31					
	LP	0.53	0.57	0.00	0.66	0.53	0.31	0.78				
	CK	0.16	0.25	0.64	0.23	0.10	0.77	0.25	0.25			
Ⅳ	SP	0.46	0.64	0.00	0.60	0.46	0.25	0.73	0.87	0.25		
	LP	0.41	0.53	0.00	0.66	0.53	0.30	0.77	0.68	0.25	0.67	
	CK	0.16	0.14	0.54	0.29	0.16	0.74	0.30	0.23	0.76	0.14	0.26

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻生育期的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice.

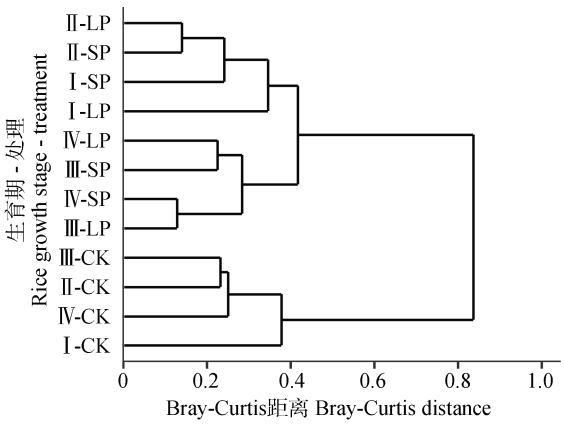

图 5 不同处理下水稻不同生育期稻田杂草群落的 UPGMA 聚类

Fig. 5 UPGMA clustering of weed communities in paddy fields at different growth stages of rice under different treatments

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻生育期的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice.

每种杂草的重要值，发现两段时期(分蘖期和孕穗期、扬花期和成熟期)的杂草群落存在明显差异，后两个时期的各杂草群落中莎草的重要值(35.4%~47.2%)相比前两个时期(52.4%~62.4%)有所下降，而碎米莎草的重要值相比分蘖期(26.6%~48.5%)和孕穗期(<17.4%)有明显上升。CK 各时期的杂草群落与 SP、LP 各时期的杂草群落间的群落相似性较低，群落相似性指数都小于 0.31，因此，CK 的 4 个时期的杂草群落被聚为了一类。

2.5 浮萍覆盖对水稻产量性状的影响

两种浮萍覆盖对水稻产量的影响不同(表 3)。SP 的水稻产量与 CK 相比显著提高 28.0%；有效穗数、结实率、千粒重和穗长与 CK 均无显著差异，但每穗粒数和穗重比 CK 分别显著增加 33.7%和 28.2%，从而提高了水稻产量。LP 的水稻的产量与 CK 并无显著差异；每穗粒数和穗重比 CK 分别显著增加 15.8%和 17.0%，但有效穗数比 CK 减少 11.7% (未达显著差异)，导致 LP 产量并未显著提高。

表 3 不同处理下的水稻产量性状

Table 3 Rice grain traits under different treatments

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number (panicles·m^{-2})	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Filled grain percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	穗长 Panicle length (cm)	穗重 Panicle weight (g)	产量 Grain yield (t·hm^{-2})
SP	218.4±9.6a	142.7±6.1a	93.62±1.56a	23.76±0.13a	14.24±0.13a	3.045±0.194a	6.964±0.544a
LP	199.2±2.9a	123.7±2.6b	94.50±0.69a	23.55±0.14a	14.04±0.22a	2.798±0.063a	5.492±0.206b
CK	225.6±15.4a	106.8±6.4c	94.94±0.88a	23.73±0.19a	13.76±0.20a	2.375±0.056b	5.441±0.534b

SP、LP 和 CK 分别表示多根紫萍覆盖、少根紫萍覆盖和不投放浮萍对照。同列不同小写字母表明处理间差异显著(P<0.05)。SP, LP and CK indicate *Spirodela polyrrhiza* mulching, *Landoltia punctata* mulching and no duckweed mulching. Different lowercase letters in the same column show significant differences among treatments at P<0.05 level.

对各时期杂草生物量与水稻产量性状进行相关分析, 结果表明, 在孕穗期、扬花期和成熟期的杂草生物量与水稻每穗粒数和穗重间均存在显著负相关, 在成熟期的杂草生物量与水稻产量间存在显著负相关, 而各时期的杂草生物量与有效穗数、结实率、千粒重和穗长等产量性状没有显著的相关性(表 4)。

表 4　水稻产量性状与各生育期杂草生物量的相关性

Table 4　Correlation between rice grain traits and weed biomass at different growth stages of rice

	生育期 Growth stage	有效穗数 Effective panicle number	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Filled grain percentage	千粒重 1000-grain weight	穗长 Panicle length	穗重 Panicle weight	产量 Grain yield
杂草生物量 Weed biomass	Ⅰ	0.094	−0.365	0.117	0.304	−0.286	−0.345	−0.190
	Ⅱ	0.071	−0.586*	0.261	−0.083	−0.449	−0.525*	−0.379
	Ⅲ	0.136	−0.545*	0.165	−0.022	−0.442	−0.598*	−0.317
	Ⅳ	−0.151	−0.684**	0.265	0.038	−0.274	−0.631*	−0.564*

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示水稻生育期的分蘖期、孕穗期、扬花期和成熟期。*和**分别表示显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)相关。Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ indicate tillering stage, booting stage, flowering stage and maturing stage of rice. * and ** indicate significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

3　讨论

3.1　浮萍覆盖与稻田杂草群落变化

在不同水稻生育期, 多根紫萍和少根紫萍都显著抑制了杂草的发生, 浮萍覆盖层的形成是杂草抑制作用的主要原因。据苏凤岩等[20]报道, 浮萍引入稻田后能在稻田中达到生物量(鲜重)为 2.15 $kg·m^{-2}$ 的覆盖层。与开阔水域相比, 致密的浮萍覆盖层显著降低水面下光照强度[21]。在光照被限制的情况下, 稻田水面下杂草的光合作用将会受到抑制[22]。由于更少的光能进入田面水, 杂草生长的环境温度也降低[23]。光照和温度是杂草萌发的关键因素, 光照和温度的降低将会抑制稻田杂草种子的萌发[24-25]。除了环境因素外, Li 等[26]研究发现, 浮萍具有极强的养分吸收能力, 能对田面水中的氮素起到缓冲作用, 降低施肥初期田面水中的氮素含量, 杂草的养分利用将会受到抑制。Bich 等[27]提出, 浮萍中还可能存在抑制陆生植物生长和萌发的化感物质, 但浮萍是否通过化感作用抑制了稻田杂草的发生仍需进一步明确。

稻田的杂草群落组成受到耕作制度、施肥模式、灌溉方式和除草方式等多方面因素的影响, 某些杂草在群落中的优势地位可能会受不同因素影响发生改变[28-31]。在本研究中, 浮萍覆盖在抑制杂草发生的同时改变了杂草的群落组成。浮萍覆盖下的杂草群落与对照组的群落相似性程度低, 相比后者, 前者阔叶类杂草的数量及鲜重的比例下降, 阔叶类杂草鸭舌草和苹的发生受到抑制, 但莎草科杂草的数量和鲜重比例在多个时期都有所增多。黄世文等[19]通过温室试验也得到了类似的研究结果, 施 150 $g·m^{-2}$ 的浮萍对莎草的分蘖、株高和鲜重均无显著影响, 但可以显著地降低鸭舌草和牛毛毡的生物量。推测阔叶类杂草如鸭舌草和苹, 相对矮小且有时以浮叶植物的状态生长, 浮萍的覆盖不仅会减少光照还会争夺生长空间。而莎草科杂草如莼菡和碎米莎草, 通常为秆丛生, 叶片多退化, 株高相对较高, 受浮萍覆盖的影响相对较小[32]。根据对上海市青浦区的稻田杂草群落调查结果, 自 20 世纪 80 年代, 由于除草剂的不合理使用和耕作制度的改变等因素, 青浦区稻田杂草群落经历了由以禾本科为主到以阔叶类杂草为主的格局改变[12]。因此, 浮萍覆盖对阔叶类杂草明显的抑制效果将有利于控制当地稻田杂草危害。

3.2　浮萍覆盖与水稻产量变化

在本研究中, 70%初始覆盖面积的两种浮萍投放至稻田, 对水稻生产未造成负面影响, 且多根紫萍覆盖下水稻产量显著提高 1.5 $t·hm^{-2}$。这与前人相近浮萍投放量下的研究结果类似, 据报道在不同的施肥条件下投放量为 200 $g·m^{-2}$ (80%覆盖面积)的浮萍引入稻田能显著增加水稻产量 0.7~1.5 $t·hm^{-2}$, 氮损失的降低和作物氮素利用率的提高被认为是浮萍能显著增加水稻产量的主要原因[26,33-34]。Yao 等[34]研究表明, 多根紫萍引入稻田中能有效抑制稻田的氨挥发损失, 并在中后期凋亡释放氮素供作物利用, 进而提高水稻氮素利用率 35%~78%, 增加水稻产量 9%~10%。世界范围内, 杂草平均造成约 37%的水稻产量损失, 是影响水稻生产的最主要因素之一[35]。但已有的稻萍结合相关报道中均未探讨水稻产量变化与稻田杂草群落变化的关系。本研究进一步地分析了水稻产量性状与杂草生物量的关系, 认为两种浮萍覆盖能在有效抑制杂草发生的同时, 使水稻的每穗粒数和穗重都有不同程度的显著增长。推测在

本研究中浮萍覆盖下水稻每穗粒数和穗重提高的主要原因，一方面在整个水稻生育期浮萍覆盖有效地控制了杂草发生，特别是在孕穗期以后显著降低了杂草的生物量，减轻了水稻幼穗分化发育过程中杂草带来的养分竞争压力，另一方面水稻的幼穗分化发育过程是水稻氮素累积的主要阶段，也是水稻产量构成过程中一个极为重要的时期[36-37]，浮萍凋亡带来的氮素释放补充了这一阶段水稻对氮素的需求。

3.3 杂草控制与生物多样性保护

农田中及农田周围的杂草群落具有调控害虫和天敌、增加土壤养分、减少水土流失和改变微气候等多种生态系统服务功能[38-40]。而当前，农业集约化所造成的杂草生物多样性丧失已成为一个全球性的问题，杂草问题的解决需要兼顾生物多样性的保护[41]。稻鸭生态种养为代表的种养结合农业模式、氮磷钾平衡施肥和间歇灌溉等措施，都被认为能在控制稻田杂草密度的同时维持杂草多样性[6,30-31]。研究认为，这些杂草控制策略都改变了稻田杂草的群落组成，有效地抑制了优势种杂草生长，使杂草逐渐趋于均匀分布，从而维持了稻田杂草的多样性[6,30-31]。同样，在本研究中浮萍覆盖抑制了优势种鸭舌草的发生，改变了杂草的群落结构，维持了稻田杂草群落的生物多样性。

4 结论

1)稻田投放初始覆盖面积 70%的多根紫萍和少根紫萍都能有效控制杂草发生，分蘖期至孕穗期杂草密度分别显著降低 60.3%~75.8%和 81.1%~90.4%，整个水稻生育期杂草生物量分别显著降低 48%以上和 81%以上。

2)两种浮萍引入稻田都改变了稻田杂草的群落组成，阔叶类杂草在浮萍覆盖层的抑制作用下密度和生物量比例下降，莎草科的莼菡和碎米莎草重要程度较高，杂草群落组成以莎草科杂草为主。浮萍覆盖下的稻田杂草群落与对照中的群落相似性低。

3) 稻田投放初始覆盖面积 70%的多根紫萍和少根紫萍未对稻田植物多样性和水稻生产造成负面影响。一方面浮萍覆盖下多数时期稻田杂草群落的多样性指数没有显著改变；另一方面浮萍减轻了水稻生长发育过程中稻田杂草带来的竞争压力，显著提高了水稻的每穗粒数和穗重，且多根紫萍覆盖显著提高了 28.0%的水稻产量。综合来看，浮萍作为常见水生植物资源，因地制宜地利用浮萍覆盖控制稻田杂草，为稻田杂草管理和生物多样性的保护提供了可行方案，对保护稻田生态系统平衡和促进农业的可持续发展有重要意义。

参考文献 References

[1] CHAUDHARY A, ADHIKARI B B, SHRESTHA J. Effect of weed species on drought tolerant rice genotypes at Sundarbazar, Lamjung, Nepal[J]. Open Agriculture, 2019, 4(1): 65–78

[2] 张自常，李永丰，张彬，等. 稗属杂草对水稻生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3177–3184
ZHANG Z C, LI Y F, ZHANG B, et al. Influence of weeds in *Echinochloa* on growth and yield of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3177–3184

[3] 田志慧，陆俊尧，袁国徽，等. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 328–336
TIAN Z H, LU J Y, YUAN G H, et al. Effects and eco-economic thresholds of *Leptochloa chinensis* and *Cyperus difformis* on the yield of direct-seeding rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 328–336

[4] 田志慧，沈国辉. 杂草资源的开发与利用[J]. 上海农业学报, 2012, 28(4): 152–155
TIAN Z H, SHEN G H. Development and utilization of weed resources[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2012, 28(4): 152–155

[5] 孙玉芳，陈宝雄，金彬，等. 有机管理对不同农田生境草本植物 α、β 和 γ 多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1617–1625
SUN Y F, CHEN B X, JIN B, et al. Effects of organic management on the diversity of α, β and γ of herbaceous plants in different agricultural habitats[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1617–1625

[6] LAL B, GAUTAM P, RAJA R, et al. Weed community composition after 43 years of long-term fertilization in tropical rice-rice system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 301–308

[7] 李香菊. 近年我国农田杂草防控中的突出问题与治理对策[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 77–84
LI X J. Main problems and management strategies of weeds in agricultural fields in China in recent years[J]. Plant Protection, 2018, 44(5): 77–84

[8] LI M J, LI R H, ZHANG J E, et al. A combination of rice cultivar mixed-cropping and duck co-culture suppressed weeds and pests in paddy fields[J]. Basic and Applied Ecology, 2019, 40: 67–77

[9] ZIMDAHL R L. Fundamentals of Weed Science[M]. 5th ed. Amsterdam: Elsevier, 2018: 557–590

[10] ARMENGOT L, JOSÉ-MARÍA L, CHAMORRO L, et al. Weed harrowing in organically grown cereal crops avoids yield losses without reducing weed diversity[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(2): 405–411

[11] HEAP I. Current status of the international herbicide-resistant weed database[DB/OL]. [2020-07-16]. http://www.weedscience.org/Home.aspx

[12] 陆峥嵘，沈健英，陆贻通. 上海稻田杂草群落变化趋势及

其因子分析[J]. 上海农业学报, 2005, 21(1): 82–86
LU Z R, SHEN J Y, LU Y T. The community succession of rice field weeds in shanghai area and factor analysis[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2005, 21(1): 82–86

[13] 沈健英, 陆庆丰. 水稻与杂草竞争模式及其系统序参量的应用[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(2): 127–132
SHEN J Y, LU Q F. Competition correlation between rice and weed and application of order parameter of system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2008, 26(2): 127–132

[14] 潘俊峰, 万开元, 李祖章, 等. 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 J F, WAN K Y, LI Z Z, et al. Effect of fertilization patterns on weed community in late rice fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 200–210

[15] CALICIOGLU O, SHREVE M J, RICHARD T L, et al. Effect of pH and temperature on microbial community structure and carboxylic acid yield during the acidogenic digestion of duckweed[J]. Biotechnology for Biofuels, 2018, 11: 275

[16] 于昌江, 朱明, 马玉彬, 等. 新型能源植物浮萍的研究进展[J]. 生命科学, 2014, 26(5): 458–464
YU C J, ZHU M, MA Y B, et al. Advances in research on duckweeds-a new energy plant[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2014, 26(5): 458–464

[17] KHVATKOV P, CHERNOBROVKINA M, OKUNEVA A, et al. Creation of culture media for efficient duckweeds micropropagation (*Wolffia arrhiza* and *Lemna minor*) using artificial mathematical optimization models[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2019, 136(1): 85–100

[18] 李可懿, 戴伟峰, 翟春花, 等. 浮萍与稻糠控制稻田杂草效果研究[J]. 现代农业科技, 2020, (1): 97–98
LI K Y, DAI W F, ZHAI C H, et al. Effect of duckweeds and rice chaff on weeds control in paddy field[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020, (1): 97–98

[19] 黄世文, 余柳青, 段桂芳, 等. 稻糠与浮萍控制稻田杂草和稻纹枯病初步研究[J]. 植物保护, 2003, 29(6): 22–26
HUANG S W, YU L Q, DUAN G F, et al. Control of weeds and rice sheath blight disease in paddy fields by rice chaff and duckweeds (*Lemna* spp.)[J]. Plant Protection, 2003, 29(6): 22–26

[20] 苏凤岩, 闻大中, 徐卿德, 等. 北方稻田生态系统研究 I. 稻萍结合系统的结构研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(2): 179–184
SU F Y, WEN D Z, XU Q D, et al. Rice field ecosystems in northern China Ⅰ. Structural study of rice-Azolla combination systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(2): 179–184

[21] WOLLENBERG J L, PETERS S C. Diminished mercury emission from waters with duckweed cover[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2009, 114(G2): G00C08

[22] CHAMARA B S, MARAMB B, CHAUHAN B S. Management of *Cleome rutidosperma* DC. using high crop density in dry-seeded rice[J]. Crop Protection, 2017, 95: 120–128

[23] CESCHIN S, SGAMBATO V, ELLWOOD N T W, et al. Phytoremediation performance of *Lemna* communities in a constructed wetland system for wastewater treatment[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 162: 67–71

[24] SUMUDUNIE H G S, JAYASURIYA K M G G. Seed dormancy and germination of seven rice field weeds from Sri Lanka[J]. Taiwania, 2019, 64(3): 221–230

[25] DERAKHSHAN A, GHEREKHLOO J. Factors affecting *Cyperus difformis* seed germination and seedling emergence[J]. Planta Daninha, 2013, 31(4): 823–832

[26] LI H, LIANG X Q, LIAN Y F, et al. Reduction of ammonia volatilization from urea by a floating duckweed in flooded rice fields[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(6): 1890–1895

[27] BICH T T N, KATO-NOGUCHI H. Allelopathic potential of two aquatic plants, duckweed (*Lemna minor* L.) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.), on terrestrial plant species[J]. Aquatic Botany, 2012, 103: 30–36

[28] 吴玮, 王俊, 廖燕俸, 等. 闽中地区再生稻田杂草种类及其群落特征[J]. 福建农业学报, 2016, 31(12): 1340–1344
WU W, WANG J, LIAO Y F, et al. Composition and characteristics of weed community in regeneration rice fields in Central Fujian[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 31(12): 1340–1344

[29] 王小武, 李双建, 丁新华, 等. 不同除草方式对稻田杂草群落及其多样性的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1667–1675
WANG X W, LI S J, DING X H, et al. Effects of different weed controls on weed communities and diversity in paddy fields[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(11): 1667–1675

[30] 沈建凯, 黄璜, 傅志强, 等. 规模化稻鸭生态种养对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 123–128
SHEN J K, HUANG H, FU Z Q, et al. Effect of large-scale rice-duck eco-farming on the composition and diversity of weed community in paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 123–128

[31] 邱佩, 崔远来, 韩焕豪, 等. 淹灌和间歇灌溉对晚稻田杂草群落多样性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 115–121
QIU P, CUI Y L, HAN H H, et al. Effect of flooding irrigation and intermittent irrigation patterns on weed community diversity in late rice fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 115–121

[32] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1961: 1
Editorial Board of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1961: 1

[33] SUN H J, DAN A, FENG Y F, et al. Floating duckweed mitigated ammonia volatilization and increased grain yield and nitrogen use efficiency of rice in biochar amended paddy soils[J]. Chemosphere, 2019, 237: 124532

[34] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Duckweed (*Spirodela polyrhiza*) as green manure for increasing yield and

reducing nitrogen loss in rice production[J]. Field Crops Research, 2017, 214: 273–282

[35] OERKE E C. Crop losses to pests[J]. The Journal of Agricultural Science, 2006, 144(1): 31–43

[36] 田昌, 靳拓, 周旋, 等. 控释尿素对环洞庭湖区双季稻吸氮特征和产量的影响[J/OL]. 作物学报, 2020: 1–12. (2020-10-05) [2020-10-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200930.1634.008.html.
TIAN C, JIN T, ZHOU X, et al. Effects of controlled-release urea on nitrogen uptake characteristics and yield of double-cropping rice around Dongting Lake area[J/OL]. Acta Agronomica Sinica, 2020: 1–12. (2020-10-05) [2020-10-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200930.1634.008.html.

[37] 伍龙梅, 李惠芬, 黄庆, 等. 幼穗分化期氮肥用量降低水稻遮光减产效应研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(9): 18–26
WU L M, LI H F, HUANG Q, et al. Research of panicle nitrogen fertilizer amount on reducing yield reduction caused by shading at young panicle differentiation stage of rice[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(9): 18–26

[38] 李志胜, 黄顶成, 徐敦明, 等. 稻田周围杂草地生境节肢动物群落的物种丰富度、优势度及多样性[J]. 福建农业大学学报: 自然科学版, 2003, 32(4): 425–429
LI Z S, HUANG D C, XU D M, et al. Species richness, dominance and diversity of arthropod community in the weed habitat surrounding a rice field[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2003, 32(4): 425–429

[39] LENKA N K, SATAPATHY K K, LAL R, et al. Weed strip management for minimizing soil erosion and enhancing productivity in the sloping lands of north-eastern India[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 104–113

[40] BLAIX C, MOONEN A C, DOSTATNY D F, et al. Quantification of regulating ecosystem services provided by weeds in annual cropping systems using a systematic map approach[J]. Weed Research, 2018, 58(3): 151–164

[41] SCHUMACHER M, OHNMACHT S, ROSENSTEIN R, et al. How management factors influence weed communities of cereals, their diversity and endangered weed species in central Europe[J]. Agriculture, 2018, 8(11): 172