

# 南方冬闲稻田杂草群落特征及其生态环境效应分析

张振兴<sup>1</sup>, 杨彤辉<sup>1</sup>, 熊昊<sup>1</sup>, 刘红梅<sup>1\*</sup>, 陈安磊<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>湖南农业大学农学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月1日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月10日

## 摘要

本研究聚焦于南方冬闲稻田杂草群落特征及其生态学效应, 采用长期定位施肥试验与田间调查相结合的方法, 分析了长期不施肥(CK)、有机肥替代减量化肥(RFC)、常规氮磷钾肥(NPK)三种施肥模式对双季稻冬闲田杂草的种类组成、密度分布、生物量积累及养分固持量的影响。结果表明, 在水稻生产过程中, 长期不同施肥模式显著影响冬闲稻田杂草的密度、生物量及碳(C)、氮(N)、磷(P)养分固持量。总体而言, 冬闲稻田禾本科杂草处于绝对优势地位, 其密度占比超过98.0%, 而其他种类杂草密度的占比较低, 仅为0.5%~1.3%。在杂草总密度方面, RFC和NPK处理较CK处理显著提高了杂草密度(平均为CK的2.7倍), 但显著降低了杂草物种数及物种丰富度指数。冬闲稻田杂草总生物量范围为2139.6~2773.9 kg·ha<sup>-1</sup>, 其中, NPK和RFC处理显著提高了杂草总生物量(约为CK处理的1.3倍), 并显著改变了杂草地上和地下生物量的分配格局, 地上部生物量占比超过85.0%。在养分固持方面, 冬闲田杂草的C、N、P总固持量分别为827.0~1225.0 kg·ha<sup>-1</sup>、22.2~32.9 kg·ha<sup>-1</sup>和2.4~7.3 kg·ha<sup>-1</sup>; NPK和RFC处理的C、N、P固持量均显著高于CK处理, 其中N固持量是CK处理的1.3~1.5倍, P总固持量则达CK处理的2.6~3.1倍。综上, 南方冬闲田杂草所产生的生态效应不可忽视, 其C、N、P固持量应纳入生态效益评估体系, 杂草生物量的增加及其养分固持功能在维系农田生态系统养分循环中具有重要作用。

## 关键词

冬闲稻田, 长期施肥, 杂草密度, 生物量, 养分固持量

## Weed Community Characteristics and Their Eco-Environmental Effects in Winter Fallow Rice Fields of Southern China

Zhenxing Zhang<sup>1</sup>, Tonghui Yang<sup>1</sup>, Hao Xiong<sup>1</sup>, Hongmei Liu<sup>1\*</sup>, Anlei Chen<sup>2\*</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 张振兴, 杨彤辉, 熊昊, 刘红梅, 陈安磊. 南方冬闲稻田杂草群落特征及其生态环境效应分析[J]. 农业科学, 2026, 16(4): 558-567. DOI: 10.12677/hjas.2026.164071

<sup>1</sup>College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha Hunan

Received: March 1, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 10, 2026

## Abstract

This study investigates the characteristics of weed communities and their ecological effects in winter fallow paddy fields across southern China. Through a long-term localized fertilization experiment combined with field surveys, it examined how three fertilization treatments—no fertilization (CK), reduced chemical fertilizer replaced by organic fertilizer (RFC), and conventional N-P-K fertilizer (NPK)—influence weed species composition, density, biomass accumulation, and retention of Carbon (C), Nitrogen (N), and Phosphorus (P) in double-cropping rice winter fallow fields. The findings revealed that long-term application of different fertilization regimes during rice cultivation significantly influenced weed density, biomass, and C, N, P retention in winter fallow paddy fields. Overall, grass weeds (Poaceae) dominated the community, accounting for over 98.0% of the total weed density, while other weed species had relatively low densities, ranging from 0.5% to 1.3%. In terms of weed density, both RFC and NPK treatments led to a significant increase compared to CK, averaging 2.7 times that of CK, yet they also markedly reduced weed species diversity and the species richness index. The total weed biomass in the winter fallow fields varied from 2139.6 to 2773.9 kg ha<sup>-1</sup>. The NPK and RFC treatments not only significantly boosted total weed biomass (approximately 1.3 times that of CK) but also substantially altered the allocation pattern between aboveground and belowground biomass, with aboveground biomass accounting for over 85.0%. Regarding nutrient retention, weeds sequestered total C, N, and P amounts of 827.0~1225.0 kg ha<sup>-1</sup>, 22.2~32.9 kg ha<sup>-1</sup>, and 2.4~7.3 kg ha<sup>-1</sup>, respectively. The C, N, and P retention under NPK and RFC treatments were substantially higher than under CK. Specifically, N retention was 1.3~1.5 times that of CK, while total P retention reached 2.6~3.1 times that of CK. In conclusion, the ecological role of weeds in southern winter fallow fields is significant and should not be underestimated. Their capacity for C, N, and P retention ought to be integrated into ecological benefit assessment systems. The increase in weed biomass and its associated nutrient retention function plays a crucial role in sustaining nutrient cycling within farmland ecosystems.

## Keywords

Winter Fallow Paddy Field, Long-Term Fertilization, Weed Density, Biomass, Nutrient Retention

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

杂草作为农田生态系统的重要功能组分，与栽培作物在生态位重叠与资源竞争中形成动态平衡关系 [1] [2]。在非耕作期，杂草群落通过固碳、养分周转、土壤微生物生态保育等途径，发挥着重要的生态调节功能 [3]。研究表明，农田杂草种群组成受多种因素影响，其中施肥措施被认为是影响杂草群落组成的关键驱动因子 [3] [4]。施肥不仅驱动土壤肥力的演变进程 [5] [6]，显著调控杂草生长态势，还可能加速其群落演替及遗传进化进程 [7]。Wan 等 [8] 在江西长期定位试验田的研究中发现，在晚稻生育期开展杂草群落动态监测，发现土壤氮、磷、钾以及有机质含量均显著影响晚稻生育期杂草群落结构，其中氮素是主要控

制因子，其次是磷和钾养分。在平衡施肥(NPK)条件下，杂草群落的物种丰富度、多样性及均匀度降低，而群落优势度显著提高。林新坚等[9]进一步证实，不同施肥处理可改变杂草的养分吸收能力和固持效率，施肥处理下杂草的养分固持量增加，展现出可观的培肥潜力。值得注意的是，现在研究多聚焦于地上部生物量相关研究，而对地下部根系的研究相对薄弱。Ma等[10]研究表明，大约四分之一的植物碳储存于地下部分，强调了根系在碳汇过程中的关键作用。长期秸秆等有机物还田被证实可通过替代部分化肥实现稻田系统可持续发展，其作用包括维持土壤肥力、减少养分流失及提高土壤养分库容等[11]。近年来的研究逐渐揭示，适度保留杂草在水稻田中具有多重生态效益，不仅可通过维持生物多样性保育天敌种群，还能增强养分循环效率并降低氮肥依赖[12]-[18]。

我国南方双季稻区存在超过 400 万公顷的冬闲田，其冬季农业生产潜力和生态效应尚未得到充分挖掘。依托中国科学院桃源农业生态试验站 1990~2024 年长期施肥定位试验平台，本研究系统解析了冬闲稻田杂草群落的生态特征及其环境效应。通过量化不同施肥模式下杂草群落结构的演变规律、生物量分配策略及 C、N、P 固持效应，揭示了南方冬闲稻田杂草的长期演替特征。研究成果可为冬闲田资源高效利用、稻田生物多样性调控提供理论依据，并为构建农田生态系统可持续管理策略积累有效数据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验地点概况

试验地位于中国科学院桃源农业生态试验站，地处湖南省桃源县(28°55'N, 111°26'E)。该区域属于亚热带季风气候区，为典型的丘陵农业区，年均降水量为 1448 mm，年均气温为 16.5℃，无霜期为 283 天，供试土壤为第四纪红色粘土发育而来的水稻土，种植制度为双季稻。田间试验开始于 1990 年，耕作层(0~20 cm)土壤初始基本肥力性状为：有机碳含量 14.2 g·kg<sup>-1</sup>，全磷含量 0.55 g·kg<sup>-1</sup>，全氮含量 1.82 g·kg<sup>-1</sup>，全钾含量 12.9 g·kg<sup>-1</sup>。

### 2.2. 试验设计

试验设置 10 个处理，本文选用其中的 3 个处理：即(1)CK 处理，不施肥；(2)NPK 处理，施化学氮、磷、钾肥；(3)RFC 处理，2/3 化学 NP 肥 + 1/3 化学钾肥 + 1/2 秸秆还田 + 紫云英还田。小区采用随机区组设计，设有 3 次重复，每个小区面积为 33.2 m<sup>2</sup>。早、晚稻均采用当地推广面积最大的水稻品种，水稻品种(组合)每 3 年更换一次。早稻于 4 月底移栽，7 月中旬收获；晚稻于 7 月下旬移栽，10 月下旬收获。施肥方面，氮肥使用尿素，磷肥使用过磷酸钙，钾肥使用氯化钾。在 1997 至 2023 年期间，全年施纯氮 183.0 kg·ha<sup>-1</sup>，纯磷 39.3 kg·ha<sup>-1</sup>，纯钾 197.2 kg·ha<sup>-1</sup>。CK 和 NPK 处理冬季休闲期不进行灌溉、栽培作物种植等农事操作；RFC 处理在冬季种植紫云英，春耕翻压还田，早、晚稻稻草在水稻收获后称取半量切碎后原位还田。其他田间管理措施与当地农民常规管理一致。

2024 年 3 月(冬闲期)，对稻田杂草进行调查。使用 1 m × 1 m 样框进行调查，每小区设置一个样框(即 1 m<sup>2</sup>)，统计各小区杂草种类和密度。同时，采集小区鲜草，置于 105℃ 下杀青 20 分钟，然后在 60℃ 烘干至恒重，用于计量杂草生物量，并对样品进行 C、N、P 含量分析[19]。杂草根系的采样在 20 cm × 20 cm 的样方内进行，采样深度为 20 cm，每个小区取 2 次重复。根系用水洗净后按上述杀青、烘干和测试分析方法处理，获得杂草根系样品及 C、N、P 测试分析数据。根系生物量依据多年调查的地上/地下生物量比值计算，其中 CK 处理比值为 1.03，NPK 和 RFC 处理比值分别为 4.74。

物种多样性指数计算公式如下：

Shannon-Wiener 多样性指数：

$$H' = -\sum P_i \times \ln P_i \quad (1)$$

$$P_i = N_i / N \quad (2)$$

Simpson 优势度指数:

$$D = \sum P_i^2 \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

Margalef 物种丰富度指数:

$$D_{mg} = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

式中,  $H'$  为多样性指数;  $P_i$  为第  $i$  种的相对多度;  $N_i$  为样方中第  $i$  物种的个体数,  $N$  为样方中总个体数;  $D$  为优势度指数;  $J$  为均匀度指数;  $D_{mg}$  为物种丰富度指数;  $S$  为物种总数;  $N$  为样方中总个体数。

养分固持量:

$$(\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = M_i \times \text{Cont} \quad (6)$$

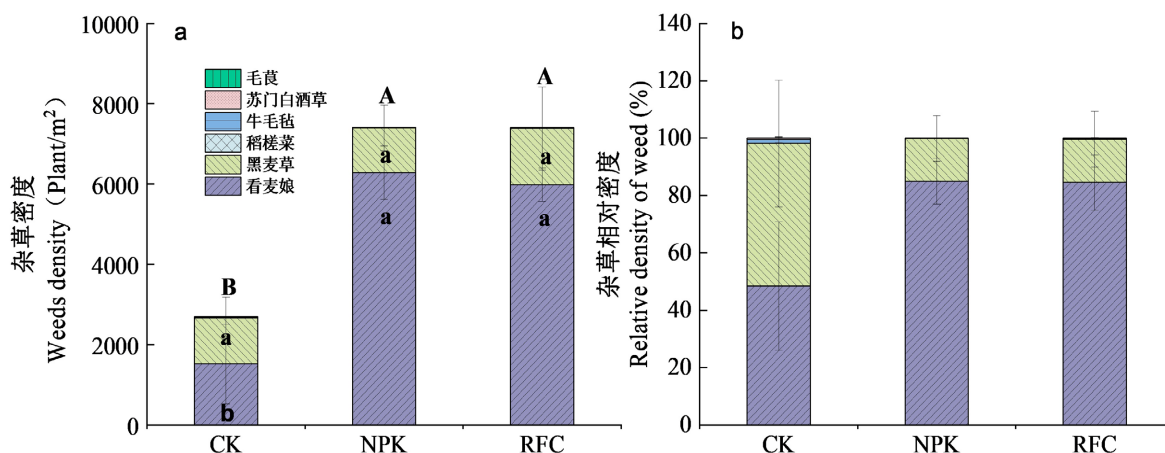
式中,  $M_i$  为(地上部生物量与地下部生物量); Cont 为 C、N、P 养分含量。

### 2.3. 数据处理及分析

数据处理采用 Microsoft Excel 2020, 作图采用 Origin 2024, 差异显著性分析则通过 SPSS 26.0 软件中的单因素分析(ANOVA)以及 LSD 和邓肯法进行( $p < 0.05$ )。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 长期不同施肥对冬闲稻田杂草种类及密度的影响



注: 处理代表水稻生育期施肥处理, 休闲期不施肥(下同); 柱上不同大写字母代表处理间总密度的差异显著性( $p < 0.05$ ); 柱中不同小写字母代表处理间看麦娘或黑麦草密度的差异显著性( $p < 0.05$ )。

Figure 1. Weed species, density and proportion in paddy fields during winter

图 1. 冬闲稻田杂草种类、密度及占比

调查研究显示, 冬闲稻田共计发现 6 种杂草(图 1a)。具体包括: 禾本科(Poaceae Barnhart)的看麦娘(*Alopecurus aequalis* Sobol)和黑麦草(*Lolium perenne* L), 菊科(Asteraceae Dumort)的稻槎菜(*Lapsanastrum apogonoides*)和苏门白酒草(*Erigeron sumatrensis* Retz), 莎草科(Cyperaceae)的牛毛毡(*Eleocharis*

*yokoscensis*), 毛茛科(Ranunculaceae Juss)的毛茛(*Ranunculus japonicus*)。其中禾本科处于优势地位, 如在 CK 处理的冬闲田中, 禾本科杂草的密度占比高达 98.2%; 而在 NPK 和 RFC 处理的冬闲田中, 这一比例更是超过 99.0%。相比之下, 稻搓菜、苏门白酒草和牛毛毡等杂草的数量相对较少, 其密度占比仅为 0.5%~1.3% (图 1b)。

总体而言, 水稻生产过程中的施肥能显著增加冬闲稻田中杂草的密度。其中, NPK 和 RFC 处理对杂草密度的影响无显著差异, 二者杂草密度分别为 7405 株  $\cdot\text{m}^{-2}$  和 7404 株  $\cdot\text{m}^{-2}$ , 是 CK 处理杂草密度(2701 株  $\cdot\text{m}^{-2}$ )的 2.7 倍。从稻田优势种群的细分情况来看, 在养分缺乏的稻田(CK)中, 黑麦草易形成优势种群, 其密度占比为 49.6%; 而在养分充足的稻田(NPK、RFC 处理)中, 看麦娘则更易形成优势种群, 其密度占比分别达到 85.0%和 84.5%。

### 3.2. 长期不同施肥冬闲稻田杂草群落生物多样性特征

从群落生物多样性结果来看(表 1), CK、NPK 和 RFC 群落多样性指数、均匀度指数、优势度指数差异均不显著。但在未施肥(CK)情况下, 其物种数、物种丰富度指数相较于 NPK、RFC 处理更高, 具体来看, 物种数高出 1.3~1.7 个单位, 物种丰富度指数高出 0.2~0.3 个单位。而且, NPK、RFC 处理与 CK 对比, 在降低均匀度指数、提高优势度指数方面呈现一致的趋势, 但差异依旧不显著( $p > 0.05$ )。总体而言, 长期施肥会显著降低物种数量和物种丰富度指数, 而有机肥替代化肥处理与 NPK 处理相比, 冬闲田杂草群落特征并无显著差异( $p > 0.05$ )。

**Table 1.** Characteristics of weed community structure in paddy fields during winter

**表 1.** 冬闲稻田杂草群落结构特征

处理 Treatment	物种数 Species	物种丰富度指数 Margalef richness index	群落多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	均匀度指数 Pielou evenness in- dex	优势度指数 Simpson domi- nance index
CK	4.7 ± 0.3a	0.5 ± 0.0a	0.6 ± 0.2a	0.4 ± 0.1a	0.7 ± 0.1a
NPK	3.0 ± 0.0b	0.2 ± 0.0b	0.4 ± 0.2a	0.3 ± 0.1a	0.8 ± 0.1a
RFC	3.3 ± 0.3b	0.3 ± 0.0b	0.4 ± 0.2a	0.3 ± 0.2a	0.8 ± 0.1a

注: 表中同一列数据(平均数 ± SE)后不同小写字母表示差异达 5%显著水平。

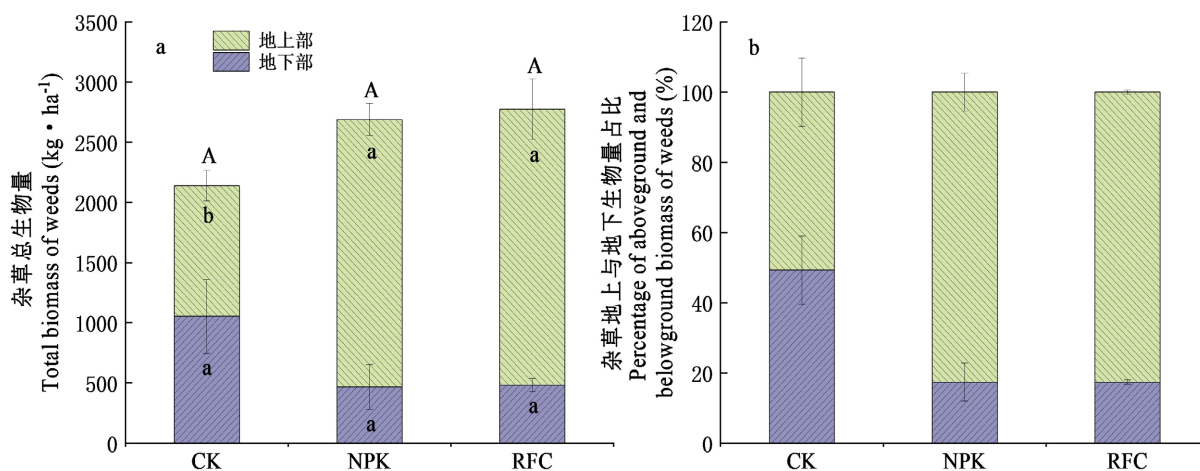
### 3.3. 长期不同施肥对冬闲稻田杂草生物量的影响

从长期施肥处理结果来看, 冬闲期杂草地上生物量范围在 1085.6~2290.6  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  之间, 其中 NPK 和 RFC 处理的地上生物量显著高于 CK 处理( $p < 0.05$ ), 分别是 CK 处理生物量的 2.0 倍和 2.1 倍(图 2a)。不同施肥处理显著影响冬闲稻田杂草地上生物量及分配比例(表 2), NPK 和 RFC 处理的杂草地上生物量显著高于 CK 处理, 看麦娘和黑麦草的生物量及分配比例在 NPK 和 RFC 处理下占主导且显著增加。具体来看, NPK 处理下看麦娘地上生物量高达 1898.2  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 远超 CK 处理的 488.8  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 其分配比例从 43.4%提升至 86.1%; RFC 处理下看麦娘地上生物量为 1887.4  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 分配比例为 84.4%, 与 NPK 处理无显著差异, 但均显著高于 CK 处理。黑麦草在 NPK 处理下地上生物量为 319.4  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , RFC 处理下更高, 达到 398.2  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 其分配比例在 NPK 和 RFC 处理下分别为 13.7%和 15.3%, 均显著高于 CK 处理的 38.4%。此外, 苏门白酒草和牛毛毡在 NPK 和 RFC 处理下未发现生长, RFC 处理下毛茛生物量仅为 0.7  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 生育期施肥改变了冬闲稻田生态环境, 导致部分杂草物种消失, 物种多样性降低。

杂草地下部生物量范围为 468.4~1054.0  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , 各处理间无显著差异( $p > 0.05$ , 图 2a)。从生物量分

布情况来看, CK 处理的地上、地下生物量基本持平, 在总生物量中占比分别为 49.3%和 50.7%; 相比之下, NPK 和 RFC 处理地上生物量明显高于地下生物量, 约为地下部的 4.7 倍(图 2b)。

总体而言, 冬闲稻田杂草总生物量处于 2139.6~2773.9 kg·ha<sup>-1</sup> 区间, 土壤肥力对杂草生物量有着显著影响, 如 NPK 和 RFC 处理的总生物量是 CK 总生物量的 1.3 倍, 同时, 土壤肥力也显著影响地上和地下生物量的分配, 如 NPK 和 RFC 处理中 85.0%以上的生物量分配了在地上部。



注: 柱上不同大写字母表示处理间的差异显著性( $p < 0.05$ ); 柱中不同小写字母表示处理间地下部或地上部处理间的差异显著性( $p < 0.05$ )。

Figure 2. Total biomass and proportion of weeds in paddy fields during winter

图 2. 冬闲稻田杂草总生物量及占比

Table 2. Above-ground biomass and proportion of weeds in paddy fields during winter

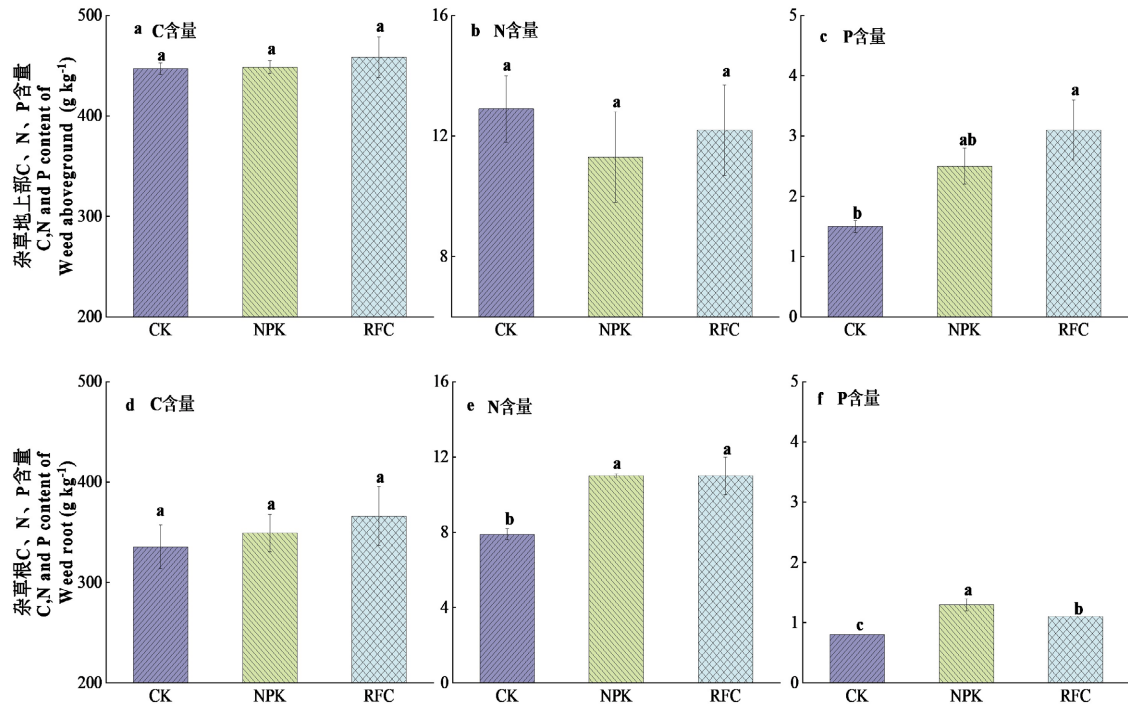
表 2. 冬闲稻田杂草地上生物量及占比

处理 Treatment	看麦娘 <i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L.	稻槎菜 <i>Lapsanastrum apogonoides</i>	苏门白酒草 <i>Erigeron suma- trens</i> Retz.	牛毛毡 <i>Eleocharis yokoscensis</i>	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i>
地上生物量 (kg·ha <sup>-1</sup> )	CK 488.8 ± 265.7b	372.5 ± 164.5a	0.4 ± 0.2a	2.0 ± 0.9	221.9 ± 194.2	—
	NPK 1898.2 ± 91.8a	319.4 ± 160.2a	2.8 ± 1.6a	—	—	—
	RFC 1887.4 ± 101.3a	398.2 ± 297.4a	4.3 ± 3.1a	—	—	0.7 ± 0.7
地上生物量 分配比例(%)	CK 43.4	38.4	0.0	0.2	17.9	—
	NPK 86.1	13.7	0.1	—	—	—
	RFC 84.4	15.3	0.2	—	—	0.0

注: “—”表示无该类杂草。表中同一列数据(平均数 ± SE)后不同小写字母表示差异达 5%显著水平。

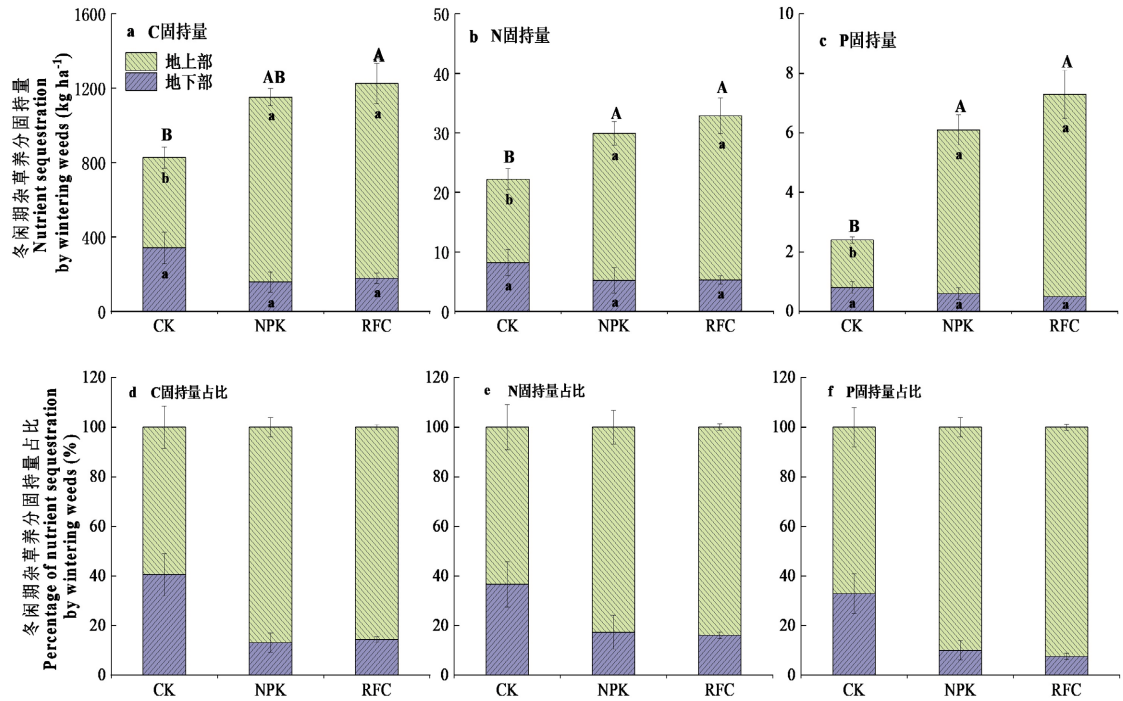
### 3.4. 冬闲稻田杂草 C、N、P 养分含量及固持量特征

杂草地上部 C 含量介于 447.0~458.5 g·kg<sup>-1</sup> (图 3a), 地下部 C 含量在 335.5~366.2 g·kg<sup>-1</sup> (图 3d)之间, 不同处理间 C 含量并无显著差异( $p > 0.05$ )。地上部与地下部 N 含量较为接近, 均保持在 7.9~12.9 g·kg<sup>-1</sup> (图 3b、图 3e)。P 含量方面, NPK 和 RFC 处理的杂草 P 含量均显著高于 CK 处理, 地上部 P 含量为 1.5~3.1 g·kg<sup>-1</sup>, 是地下部 P 含量(0.8~1.3 g·kg<sup>-1</sup>) (图 3c、图 3f)的 1.7 倍。



注：柱上不同小写字母表示处理间的差异显著性(p < 0.05)。

Figure 3. C, N and P content in the aboveground and underground parts of weeds in paddy fields during winter  
图3. 冬闲稻田杂草地上部与地下部 C、N、P 含量



注：柱上不同大写字母表示处理间固持总量差异显著性(p < 0.05)；柱中不同小写字母表示处理间地上部或地下部处理间的差异显著性(p < 0.05)。

Figure 4. C, N, and P retention amounts and their distribution proportions in weeds in paddy fields during winter  
图4. 冬闲稻田杂草 C、N、P 固持量及固持量分配占比

冬闲稻田杂草 C、N、P 总固持量分别为 827.0~1225.0 kg·ha<sup>-1</sup>、22.2~32.9 kg·ha<sup>-1</sup> 和 2.4~7.3 kg·ha<sup>-1</sup> (图 4a~图 4c)。其中, NPK 和 RFC 处理在 N、P 总固持量上显著高于 CK 处理( $p < 0.05$ ), 二者 N 固持量分别是 CK 处理的 1.3 倍和 1.5 倍, P 总固持量分别是 CK 处理的 2.6 倍和 3.1 倍。

从 C、N、P 总固持量分布占比(图 4d~图 4f)分析, 各处理 C、N、P 固持量主要集中于杂草地上部。具体而言, CK 处理 C、N、P 固持量占比分别为 59.4%, 63.4%和 67.1%, NPK 处理则为 86.8%、82.7%和 90.0%, RFC 处理为 85.6%、83.9%和 92.4%。综合来看, 冬闲田杂草凭借较高的地上生物量, 展现出显著的 C、N、P 固持能力, 且施肥措施进一步提高了地上部的 C、N、P 的固持量。

## 4. 讨论

湖南为双季稻核心产区, 实现冬闲田的合理开发利用对固持土壤养分、提升土壤肥力有着重要意义。而探究双季稻冬闲田的杂草群落结构及其养分吸收状况与水稻生育期施肥的关系, 对稻田残留养分利用以及杂草管控等方面, 有不可忽视的价值。

长期施肥通过诱导杂草群落重构而形成优势种群的竞争优势。本研究发现不同施肥处理下冬闲期杂草生物量、群落结构及多样性参数的动态响应, 与前人研究结论相吻合[5] [20]-[22]。杂草总密度 NPK > RFC > CK, NPK 处理总密度最高, 为 7405 株·m<sup>-2</sup>, RFC 处理总密度为 7404 株·m<sup>-2</sup>。与 CK 相比, NPK、RFC 处理分别提高为 174.2%; RFC 处理冬闲稻田杂草总生物量最高, 为 2773.9 kg·ha<sup>-1</sup>, 较 CK 提高 30.0%, 这些变化为双季稻冬闲田杂草田间综合管理及应用提供了较好的理论支撑。本研究发现在水稻生育期长期施用氮、磷、钾肥情况下, 杂草密度、总生物量相对不施肥(CK)处理高, 其中施肥处理中看麦娘均超过 80.0%。这与李昌新等[23]的调查结果一致, 验证了养分输入对杂草种群的正向调控作用。研究发现, 不同施肥处理不仅影响了冬闲期杂草 C、N、P 含量的波动, 还通过改变总生物量影响了杂草对这些养分的固持量。然而, 冬闲期杂草的 C、N、P 含量及其固持量是否可作为土壤肥力的敏感指标, 仍需进一步研究验证, 长期施肥可显著提高水稻籽粒 N、P、Ca、Mg、S 等养分含量[24]。Huang 等[25]研究表明, 水稻种植系统中休闲期自然发生的杂草可以清除无机氮, 从而降低氮素流失对环境的风险, 在生态系统服务方面有很大的潜力。进一步研究表明, 不同施肥处理下, 冬闲田杂草生物量的增加显著提升了其对 C、N、P 的固持量, 且各施肥处理的 C、N、P 固持量均显著高于不施肥, 增幅范围分别为 39.3%~141.1%、34.6%~241.8%和 158.0%~581.8%。

冬闲期杂草具有养分固持效应, 长期来看, 通过翻压入土可促进土壤肥力的长期累积, 为作物生长提供有利的物理、化学和生物学环境; 短期来看, 冬闲杂草翻压入土后, 在水稻生育期分解释放出的 N、P 等养分能为水稻吸收利用[9]。虽本研究已明确杂草 C、N、P 固持量与施肥模式有显著相关性, 但要判定其能否作为土壤肥力的敏感性指标, 仍需借助长期定位观测来进行验证。长期施肥既能调控作物生长期养分吸收与分配过程, 又可驱动冬闲期杂草生物量配置以及营养元素累积的动态变化。

## 5. 结论

南方冬闲稻田杂草优势种群为看麦娘, 其密度占比超过 98.0%。RFC 和 NPK 处理显著提高了杂草的总密度, 同时显著增加了杂草的总生物量, 但降低了杂草物种多样性和丰富度, 并改变了杂草地上和地下生物量的分配格局。在养分固持方面, NPK 和 RFC 处理显著提高了杂草对 C、N、P 的固持量, 平均为 1188.6 kg·ha<sup>-1</sup>、31.4 kg·ha<sup>-1</sup> 和 6.7 kg·ha<sup>-1</sup>。

综合来看, 杂草在南方冬闲稻田中扮演着重要生态角色, 其对 C、N、P 的固持功能具有增碳、固氮和活磷作用, 对维持农田生态系统的养分循环具有重要意义。因此, 杂草的生态功能应被纳入农田生态效益的评估体系中, 未来的研究应探讨如何优化施肥和杂草管理策略来进一步提升其生态效应。

## 基金项目

国家重点研发计划(2022YFD1300805); 湖南省自然科学基金(2022JJ30644)。

## 参考文献

- [1] 潘俊峰, 万开元, 陶勇, 等. 基于农田养分管理的杂草生态防控策略[J]. 植物保护, 2014, 40(3): 5-9, 36.
- [2] 扎桑. 作物格局、土壤耕作和水肥管理对农田杂草发生的影响及其调控机制研究[J]. 农村实用技术, 2024(9): 88-89.
- [3] 王卫, 陈安磊, 谢小立, 等. 长期不同施肥对冬闲期稻田土壤种子库和地上杂草群落的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 365-369.
- [4] 李照全, 尹力初, 周卫军, 等. 农田管理措施对红壤稻田系统杂草种群结构的影响[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(2): 239-241, 245.
- [5] 李儒海, 强胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作制水稻田杂草群落的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3236-3243.
- [6] 万开元, 潘俊峰, 陶勇, 等. 长期施肥对农田杂草的影响及其适应性进化研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2943-2949.
- [7] Neve, P., Vila-Aiub, M. and Roux, F. (2009) Evolutionary-Thinking in Agricultural Weed Management. *New Phytologist*, **184**, 783-793. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03034.x>
- [8] Wan, K., Tao, Y., Li, R., Pan, J., Tang, L. and Chen, F. (2012) Influences of Long-term Different Types of Fertilization on Weed Community Biodiversity in Rice Paddy Fields. *Weed Biology and Management*, **12**, 12-21. <https://doi.org/10.1111/j.1445-6664.2011.00430.x>
- [9] 林新坚, 王飞, 王长方, 等. 长期施肥对南方黄泥田冬春季杂草群落及其 C、N、P 化学计量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2012, 20(5): 573-577.
- [10] Ma, H., Mo, L., Crowther, T.W., Maynard, D.S., van den Hoogen, J., Stocker, B.D., et al. (2021) The Global Distribution and Environmental Drivers of Aboveground versus Belowground Plant Biomass. *Nature Ecology & Evolution*, **5**, 1110-1122. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01485-1>
- [11] Chen, A., Zhang, W., Sheng, R., Liu, Y., Hou, H., Liu, F., et al. (2021) Long-Term Partial Replacement of Mineral Fertilizer with *in Situ* Crop Residues Ensures Continued Rice Yields and Soil Fertility: A Case Study of a 27-Year Field Experiment in Subtropical China. *Science of the Total Environment*, **787**, 147523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147523>
- [12] 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.
- [13] 冉海燕, 黄兴成, 兰献敏, 等. 长期不同施肥处理对黄壤性水稻田杂草生物多样性的影响[J]. 杂草学报, 2022, 40(4): 7-14.
- [14] Jiang, M., Guo, K., Chen, Z., Wang, J., Huang, L. and Shen, X. (2024) The Responses of Weed Communities to Field Nutrients and Their Ecological Benefits in Rice Fields: A Review. *Crop Science*, **64**, 2945-2960. <https://doi.org/10.1002/csc2.21326>
- [15] Huang, C.C., Tsai, M.H., Lin, W.T., Ho, Y.F. and Tan, C.H. (2006) *Paddy and Water Environment*, **4**, 199-204. <https://doi.org/10.1007/s10333-006-0049-3>
- [16] Rizzo, A., Boano, F., Revelli, R. and Ridolfi, L. (2013) Role of Water Flow in Modeling Methane Emissions from Flooded Paddy Soils. *Advances in Water Resources*, **52**, 261-274. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.016>
- [17] Yao, Y., Zhang, M., Tian, Y., Zhao, M., Zhang, B., Zhao, M., et al. (2017) Duckweed (*Spirodela polyrhiza*) as Green Manure for Increasing Yield and Reducing Nitrogen Loss in Rice Production. *Field Crops Research*, **214**, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.021>
- [18] 程传鹏, 万开元, 陶勇, 等. 不同轮作制度下施肥对冬小麦田间杂草群落及小麦生长的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 370-378.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 431-472.
- [20] 尹力初, 蔡祖聪. 长期定位施肥小麦田间杂草生物多样性的变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2005, 13(3): 57-59.
- [21] 马涛, 童云峰, 刘锦霞, 等. 不同施肥处理高寒草甸植物群落物种多样性与生产力的关系[J]. 草原与草坪, 2008(4): 34-38.

- 
- [22] 蒋敏, 沈明星, 沈新平, 等. 长期不同施肥方式对麦田杂草群落的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1746-1756.
- [23] 李昌新, 赵锋, 芮雯奕, 等. 长期秸秆还田和有机肥施用对双季稻田冬春季杂草群落的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 142-147.
- [24] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 283-290.
- [25] Huang, M., Shan, S., Cao, F., Chen, J. and Zou, Y. (2018) The Potential of Naturally Occurring Fallow Weeds to Scavenge Nitrogen in Rice Cropping Systems. *Ecological Indicators*, **93**, 183-187.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.002>