



# 农业资源与环境学报

CSCD核心期刊  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊

## JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

### 长期不同施肥对黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落的影响

叶照春, 黄兴成, 冉海燕, 陈仕红, 兰献敏, 何秀龙, 杨叶华, 李渝

引用本文:

叶照春, 黄兴成, 冉海燕, 陈仕红, 兰献敏, 何秀龙, 杨叶华, 李渝. 长期不同施肥对黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(6): 1368–1376.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0093>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### [秸秆还田与氮肥管理对稻田杂草群落和水稻产量的影响](#)

陈浩, 张秀英, 吴玉红, 李厚华, 郝兴顺, 王艳龙, 王薇, 张春辉

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(6): 500–507 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0074>

#### [长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响](#)

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

#### [长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响](#)

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

#### [华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响](#)

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

#### [长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征](#)

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(5): 422–430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

叶照春, 黄兴成, 冉海燕, 等. 长期不同施肥对黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1368–1376.

YE Z C, HUANG X C, RAN H Y, et al. Effect of different long-term fertilization treatments on the spring weed community in winter fallow paddy field in yellow soil area under the single-rice cropping system[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(6): 1368–1376.

## 长期不同施肥对黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落的影响

叶照春<sup>1</sup>, 黄兴成<sup>2</sup>, 冉海燕<sup>1</sup>, 陈仕红<sup>1</sup>, 兰献敏<sup>1</sup>, 何秀龙<sup>1</sup>, 杨叶华<sup>2</sup>, 李渝<sup>2\*</sup>

(1. 贵州省农业科学院植物保护研究所, 贵阳 550006; 2. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006)

**摘要:**为探讨长期不同施肥模式下杂草群落变化及其与土壤养分相关性,依托一项连续24年长期施肥试验,采用田间调查法,对不平衡施肥[氮磷肥(NP)、磷钾肥(PK)、氮钾肥(NK)]、常量化肥(NPK)、单施有机肥(M)、1/2有机肥替代化肥(1/2MNP)、不施肥(CK)模式下黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落变化及其与土壤养分相关性进行研究。结果表明,长期不同施肥模式下春季杂草密度、生物量、群落多样性等均发生变化。M处理下土壤养分均较高,杂草群落总密度1 208.44 株·m<sup>-2</sup>、总生物量1 071.24 g·m<sup>-2</sup>,均为最高,与CK处理相比,春季杂草总密度增加37.74%、总生物量增加179.58%,说明单施有机肥可提升土壤养分,促进春季杂草生长。不同处理对杂草群落影响存在差异:M处理下棒头草(*Polypogon fugax*)等未发生;长期施用无机化肥处理早熟禾(*Poa annua*)发生密度(0~4.89株·m<sup>-2</sup>)较低;缺磷处理下日本看麦娘(*Alopecurus japonicus*)发生密度(36.00株·m<sup>-2</sup>)最低。同时,缺氮导致杂草群落多样性指数增加、优势度指数降低,群落结构相对复杂;缺磷则反之。研究表明,全氮、碱解氮和全磷是影响杂草密度的关键因子,生产上可通过合理施肥控制田间杂草发生,稳定土壤肥力及物种多样性,促进农业生态系统发挥出最大生态效应。

**关键词:**长期施肥;黄壤;单季稻;冬闲田;杂草群落;生物多样性

中图分类号:S451 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)06-1368-09 doi: 10.13254/j.jare.2023.0093

### Effect of different long-term fertilization treatments on the spring weed community in winter fallow paddy field in yellow soil area under the single-rice cropping system

YE Zhaochun<sup>1</sup>, HUANG Xingcheng<sup>2</sup>, RAN Haiyan<sup>1</sup>, CHEN Shihong<sup>1</sup>, LAN Xianmin<sup>1</sup>, HE Xiulong<sup>1</sup>, YANG Yehua<sup>2</sup>, LI Yu<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agriculture Sciences, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** To understand the changes of spring weed community diversity and the correlation with soil nutrients under different long-term fertilization models, a field investigation based on a continuous 24-year long-term fertilization test was conducted in winter fallow paddy field in the yellow soil area of Guizhou Province, China, under a single-rice cropping system. The different treatments were unbalanced fertilization (NP, PK, NK), constant fertilizer (NPK), single organic fertilizer (M), 1/2 organic fertilizer instead of chemical fertilizer (1/2 MNP), and no fertilization (CK). The results showed that spring weed density, biomass, and community diversity all changed under the conditions of the different long-term fertilization modes. Under the M treatment, soil nutrients were all higher, and the total density and total biomass of the weed community were both highest (1 208.44 plants·m<sup>-2</sup> and 1 071.24 g·m<sup>-2</sup>, respectively). Compared with the CK treatment, the total density of weeds was 37.74% higher, and the total biomass was 179.58% higher. These results indicated that the M treatment improves soil nutrients and increases weed density and biomass in spring. The different treatments had different effects on the weed community. Under the long-term single application of organic fertilizer (M), *Polypogon fugax* did not occur. Under the condition of long-term use of inorganic fertilizer, the density of *Poa annua* was lowest, from 0~4.89 plants·m<sup>-2</sup>, and under phosphorus deficiency,

收稿日期:2023-02-23 录用日期:2023-05-15

作者简介:叶照春(1980—),男,贵州开阳人,硕士,副研究员,主要从事农田杂草研究与防控。E-mail:yezhaochun1@163.com

\*通信作者:李渝 E-mail:liyu83110@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31860132);贵州科技条件与服务能力建设项目(黔科合服企〔2020〕4007)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31860132); The Construction Project of Science and Technology Conditions and Service Capacity of Guizhou, China (QianKeHeFuQi〔2020〕4007)

*Alopecurus japonicus* was suppressed, showing its lowest density ( $36.00 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}$ ). These results indicated that the different long-term fertilization treatments could inhibit the occurrence of different weeds. In terms of weed biodiversity, the weed community diversity index increased, the dominance index decreased, and the weed community structure was relatively complex under the condition of the nitrogen deficiency. On the contrary, the diversity index decreased, the dominance index increased, and the community structure was relatively simple under phosphorus deficiency. Our results indicated that total nitrogen, alkaline nitrogen, and total phosphorus were the key factors affecting weed density. Hence, reasonable fertilization can control the damage caused by weeds in the field and stabilize soil fertility and species diversity. Moreover, it can promote the agricultural ecosystem to its maximum ecological effect.

**Keywords:** long-term fertilization; yellow soil; single-rice cropping system; winter fallow paddy field; weed community; community diversity

陆地生态系统中植物和土壤是紧密联系、相互关联的<sup>[1]</sup>。越来越多的研究表明,植物种类和植物性状可以影响植物与微生物的互作关系<sup>[2]</sup>和土壤的养分循环<sup>[3]</sup>。杂草作为农田生态系统中植物多样性的主要组成部分,能有效改善作物生态系统的结构,调节农田生物物种多样性和数量配置,促进土壤中矿质元素和有机质的循环和能量流转<sup>[4]</sup>。植物种类是独特的,每一种都会影响农田生态系统的功能<sup>[5]</sup>,其发生种类和数量能够客观反映其生境特征,对生境的土壤、水文、生态环境等具有指示性<sup>[6]</sup>,这对指导农田科学管理具有重要意义。反之,农田管理措施也能对田间杂草的种群组成及其生物多样性产生影响。施肥是田间管理的主要措施,大量实践表明,化肥虽能快速提高作物产量,但长期施用不仅会影响土壤结构、土壤肥力<sup>[7-10]</sup>,还会对土壤生物多样性等造成严重影响<sup>[11-13]</sup>,从而使杂草群落也随之发生变化<sup>[14-15]</sup>。例如:潘俊峰等<sup>[16]</sup>的研究表明,长期不同施肥措施显著改变了杂草的种群组成、群落数量和结构;冯伟等<sup>[17]</sup>的研究表明,长期均衡的施肥方式有利于维持土壤杂草种子库多样性,从而提高农田生态系统生产力和稳定性;Wan等<sup>[18]</sup>的研究表明,晚稻田土壤中氮、磷、钾以及有机质含量都会影响杂草的群落结构;林新坚等<sup>[19]</sup>研究福建长期定位试验稻田杂草时发现,与不施肥处理相比,化肥+牛粪、化肥+秸秆还田及化肥均衡施用处理均降低了田间杂草群落的多样性指数。杂草群落变化反过来又影响土壤肥力变化,有研究表明杂草的生长与翻压能改善稻田土壤结构,提升土壤肥力<sup>[20]</sup>。当前,开展长期不同施肥方式下农田生态系统群落结构和生物多样性的变化规律研究已成为生态系统研究的重要内容之一<sup>[21]</sup>,它能够揭示物种间、生物与物理环境间紧密的相互作用关系,其表现出的多样性与生产力的关系更能真实地反映物种多样性在长期进化过程中对生产力的长期稳定效应,可为农田科学管理提供依据。因此,本研究立足于农业农村部

贵州耕地保育与农业环境科学观测试验站的一项连续24年长期施肥试验,开展黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落多样性调查研究,探讨长期不同施肥条件下,黄壤稻田春季杂草群落的结构特征、多样性指数变化及其与土壤养分因子之间的关系,以期为农田杂草综合管理及多样性保护提供依据,促进农田生态系统的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于贵州省贵阳市花溪区贵州省农业科学院内( $106^{\circ}39'52''\text{E}, 26^{\circ}29'49''\text{N}$ ),地处黔中丘陵区,属亚热带季风气候,平均海拔1 071 m,年均气温15.3℃,年均日照时数1 354 h,相对湿度75.5%,全年无霜期270 d,年降水量1 100~1 200 mm。试验地土壤为黄壤性水稻土黄泥田土种,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。该长期定位试验于1994年开始基础设施建设和匀地,1995年开始连续监测。1994年采集基础土样,其耕层(0~20 cm)土壤基本性质为:有机质 $44.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮 $1.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷 $0.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾 $16.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 $159.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $13.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $294.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH值6.75。

### 1.2 试验设计

试验采用大区对比试验设计,大区面积 $201 \text{ m}^2$ ( $35.7 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$ ),试验共设7个处理:NP(氮磷肥)、PK(磷钾肥)、NK(氮钾肥)、NPK(常量化肥)、M(单施有机肥)、1/2MNP(1/2有机肥替代1/2化肥)、CK(不施肥)。供试化肥为尿素(含N 46.0%)、过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12.0%)和氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%);有机肥为牛厩肥,鲜基养分多年测试平均养分含量为N $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、K<sub>2</sub>O $6.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同处理施肥量见表1。试验每年种植一季中稻,每年4月中旬育秧,6月中旬插秧,10月中旬收割,生育期为185 d,冬季翻耕炕田。试验过程中不使用除草剂和杀虫剂等化学农药。所有

表1 不同处理施肥量

Table 1 The application amount of fertilizer on the different treatments

处理 Treatment	鲜牛厩肥 Cattle fresh manure/ (t·hm <sup>-2</sup> )	N/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
NP	0	165.0	82.5	0
PK	0	0	82.5	82.5
NK	0	165.0	0	82.5
NPK	0	165.0	82.5	82.5
M	61.1	165.0	79.4	366.6
1/2MNP	30.6	165.0	81.0	183.3
CK	0	0	0	0

处理除施肥差异外,其他农事活动均保持一致。

### 1.3 调查方法

杂草调查于2019年3月12日进行,为冬闲田春季杂草生长旺盛期。调查时将试验地不同处理大区沿长边3等分,设置3个调查取样重复小区,沿每个小区对角线随机选择3点取样,样方面积0.25 m<sup>2</sup>(0.5 m×0.5 m),调查记录田间杂草种类,并将样方内所有杂草拔出,带回实验室分类统计株数、称量其生物量。

于2019年11月采集土壤样品,每个重复小区采用梅花布点法采集0~20 cm耕层土样,土壤混合均匀后带回室内自然风干,研磨制样;测试有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和pH值8项指标,测试方法均参照《土壤农化分析》<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据处理

杂草密度为每平方米的杂草株数;相对丰度=(相对密度+相对频度)/2,其中相对密度为小区中某种杂草的密度与小区中所有杂草的密度之和的比值;

相对频度为小区中某种杂草的频度与小区中所有杂草的频度之和的比值。将相对丰度作为衡量某种杂草重要程度的指标。

物种多样性指数计算公式如下:

Shannon-Wiener多样性指数: $H'=-\sum P_i \times \ln P_i$  (1)

$$P_i=N_i/N$$

Simpson优势度指数: $D=\sum P_i^2$  (2)

Pielou均匀度指数: $J=H'/\ln S$  (3)

Margalef物种丰富度指数: $D_{mg}=(S-1)/\ln N$  (4)

式中:S为物种总数;N为样方中总个体数; $N_i$ 为样方中第*i*物种的个体数。

数据处理与统计分析采用Microsoft Office 2020和SPSS 16.0进行;图表采用Origin 2021制作;采用Canoco 5.0对土壤养分和杂草密度数据进行冗余分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥处理对黄壤稻田土壤性质的影响

长期不同施肥处理下黄壤稻田土壤主要养分及pH值发生明显变化(表2)。不同处理有机质含量在38.72~57.24 g·kg<sup>-1</sup>之间,全磷含量在0.80~1.10 g·kg<sup>-1</sup>之间,全钾含量在15.59~18.88 g·kg<sup>-1</sup>之间,全氮含量在1.82~2.76 g·kg<sup>-1</sup>之间,有效磷含量在8.33~18.80 mg·kg<sup>-1</sup>之间,碱解氮含量在116.00~188.67 mg·kg<sup>-1</sup>之间,速效钾含量在233.33~335.00 mg·kg<sup>-1</sup>之间;pH值在6.42~7.02之间。M处理下有机质、全磷、全氮、碱解氮、速效钾含量最高,与1994年背景值相比呈增长趋势,说明单施有机肥(M)有利于提升土壤养分。CK处理下pH值最大,M处理下pH值最小,与1994年pH值比较,CK、NP、PK、NK处理呈增长趋势,NPK处

表2 长期不同施肥处理下土壤性质的变化

Table 2 Changes of soil properties under the long-term different fertilization treatments

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Effective phosphorus/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	7.02±0.08a	39.70±0.52b	0.85±0.01d	17.22±0.46ab	1.89±0.06c	8.33±0.27c	116.67±5.67c	250.00±10.69cd
NP	6.89±0.05ab	40.46±1.15b	1.03±0.09bc	16.45±0.36ab	1.93±0.07c	15.70±1.20b	123.33±3.53c	233.33±4.48d
PK	6.85±0.05ab	38.72±0.73b	1.01±0.07c	15.59±0.13b	1.82±0.01c	18.80±1.08a	117.67±4.33c	295.00±1.53b
NK	6.81±0.03ab	38.96±0.69b	0.80±0.01e	16.45±0.38ab	1.86±0.04c	8.47±0.27c	116.00±2.65c	317.33±5.84a
NPK	6.74±0.05b	48.18±9.03ab	1.06±0.01ab	16.66±0.46ab	1.90±0.03c	15.43±0.93b	122.00±4.16c	264.33±6.23c
M	6.42±0.1c	57.24±1.01a	1.10±0.03a	18.12±1.78ab	2.76±0.04a	16.83±0.24ab	188.67±2.60a	335.00±5.51a
1/2MNP	6.53±0.09c	48.57±1.09ab	1.08±0.01ab	18.88±1.27a	2.40±0.02b	16.93±1.07ab	153.33±5.81b	296.67±5.04b
1994年	6.75	44.90	0.95	16.40	1.96	13.40	159.00	294.00

注:表中数值为平均值±标准误;同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Values in the table are mean value±standard error; Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ .

理基本保持稳定,其余处理呈下降趋势。综合来看,长期施用有机肥或不施肥对土壤性质影响最大,长期施用有机肥有利于提升土壤肥力,使土壤pH值下降,长期不施肥或不平衡施肥造成土壤肥力下降、pH值增加。

## 2.2 对黄壤稻田冬闲田春季杂草群落的影响

### 2.2.1 对黄壤稻田冬闲田春季杂草发生密度的影响

通过对试验田进行调查共发现冬闲田春季杂草17种,隶属10科、17属(表3)。长期不同施肥处理冬闲田春季田间杂草总密度发生明显变化,其中M处理田间杂草群落总密度最高,为1 208.44 株·m<sup>-2</sup>,较CK(877.33 株·m<sup>-2</sup>)增加37.74%,NPK、1/2MNP处理次之,分别为1 020.44、1 004.44 株·m<sup>-2</sup>,较CK分别增

加16.31%、14.49%;NP处理最低,为761.33 株·m<sup>-2</sup>,较CK降低了13.22%(图1)。各处理间不同杂草密度也发生了变化,如棒头草在NK处理下发生密度最高,为591.11 株·m<sup>-2</sup>,CK处理次之,为506.67 株·m<sup>-2</sup>,而在M处理下未发生;早熟禾在M处理下发生密度最高,为586.67 株·m<sup>-2</sup>,1/2MNP处理次之,为126.67 株·m<sup>-2</sup>,而在其他处理发生较少或未发生;日本看麦娘在NPK处理下发生密度最高,为572.89 株·m<sup>-2</sup>,NP处理次之,为443.56 株·m<sup>-2</sup>,在NK处理下发生密度仅为36 株·m<sup>-2</sup>;萹蓄在M处理下未发生,其余处理均有发生。这充分证明了长期不同施肥处理对杂草种类及发生密度存在较大影响,特别是对同属禾本科的棒头草、早熟禾、日本看麦娘影响尤为明显。长期施用有

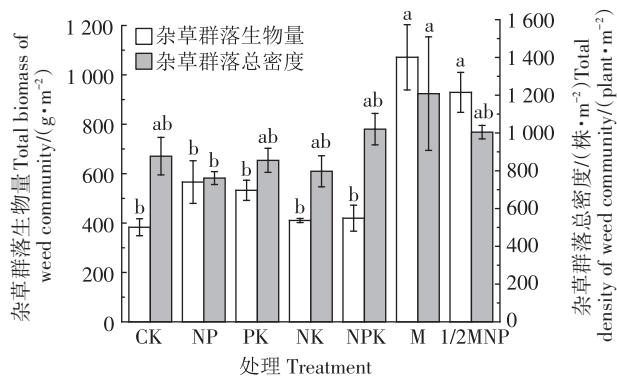
表3 长期不同施肥处理下黄壤单季稻冬闲田春季杂草物种组成及密度(株·m<sup>-2</sup>)

Table 3 Spring weeds species composition and density in winter fallow paddy field of yellow soil under single-rice cropping system with long-term different fertilization treatment (plants·m<sup>-2</sup>)

杂草种类 Weed species		CK	NP	PK	NK	NPK	M	1/2MNP
禾本科	棒头草 <i>Polypogon fugax</i> Nees ex Steud.	506.67±90.72a	52.44±40.44c	332.89±103.98ab	591.11±116.12a	221.33±129.52bc	—	101.33±52.53bc
	早熟禾 <i>Poa annua</i> L.	17.33±6.30b	4.44±4.44b	4.89±4.89b	—	—	586.67±337.27a	126.67±18.10b
	日本看麦娘 <i>Alopecurus japonicus</i> Steud.	145.33±65.33de	443.56±34.71ab	119.11±30.57de	36.00±18.00e	572.89±49.64a	257.78±79.56cd	363.56±62.08bc
菊科	小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	75.56±9.25c	81.78±19.23bc	162.22±10.05ab	49.33±7.42c	56.89±24.13c	129.78±56.15abc	198.67±21.17a
	稻槎菜 <i>Lapsana apogonoides</i> Maxim.	12.89±2.35b	10.67±2.78b	4.44±1.94b	33.33±2.67a	26.22±3.80a	12.00±2.04b	7.56±3.11b
	泥胡菜 <i>Hemistepta lyrata</i> (Bunge) Bunge.	5.33±3.53a	11.11±3.11a	10.22±4.64a	4.44±1.18a	9.33±2.78a	8.44±3.80a	6.67±2.04a
	鼠鞠草 <i>Gnaphalium affine</i> D. Don.	4.00±2.78a	—	3.56±0.44a	0.89±0.44a	0.89±0.89a	0.44±0.44a	3.11±1.94a
	钻叶紫菀 <i>Aster subulatus</i> Michx.	4.44±2.47a	3.11±1.94a	1.78±1.18a	4.00±2.67a	3.11±1.94a	1.33±0.77a	4.00±2.67a
蓼科	萹蓄 <i>Polygonum aviculare</i> L.	20.89±2.22b	19.11±3.56b	48.44±7.15a	18.67±3.53b	16.89±1.9b	—	3.11±2.47c
	皱叶酸模 <i>Rumex crispus</i> L.	25.78±9.81b	42.22±2.91ab	24.00±3.53b	15.11±1.94b	20.89±4.51b	62.22±17.32a	15.56±3.64b
十字花科	芥 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	—	—	0.44±0.44	—	—	—	—
石竹科	牛繁缕 <i>Malachium aquaticum</i> (L.) Fries( <i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.).	13.33±7.06d	36.00±8.74cd	63.56±7.59bc	10.22±5.24d	47.56±10.05cd	104.89±11.56ab	108.89±30.91a
玄参科	通泉草 <i>Mazus japonicus</i> (Thunb.) O. Kuntze.	15.11±9.18ab	1.78±1.18b	9.33±3.85ab	1.78±1.78b	4.00±4.00b	0.44±0.44b	25.33±9.37a
毛茛科	扬子毛茛 <i>Ranunculus sieboldii</i> Miq.	24.00±10.58c	42.67±3.85ab	49.33±1.54a	31.11±5.01bc	35.11±5.88ab	34.22±3.20ab	27.11±3.11bc
紫草科	附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i> (Trev.) Benth. ex Baker et Moore.	4.89±0.89ab	8.89±3.47a	11.56±2.70a	0.44±0.44b	4.89±3.11ab	8.44±1.60ab	9.78±3.47a
蔷薇科	朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i> L.	1.78±1.78b	3.56±2.91b	9.33±2.04a	0.89±0.44b	0.44±0.44b	0.89±0.44b	0.89±0.89b
茜草科	猪殃殃 <i>Galium aparine</i> L. var. <i>tenerum</i> Gren. et (Godr.) Rebb.	—	—	—	—	—	0.89±0.44a	2.22±2.22a

注:同行不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。“—”表示杂草未发生。下同。

Note: Different lowercase letters in a row indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ ; “—” indicates the weed did not occur. The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ).

图1 长期不同施肥处理对黄壤稻田冬闲田春季杂草群落总密度、总生物量的影响

Figure 1 The influences of long-term different fertilization treatments on the total density and total biomass of spring weed community in winter fallow paddy field of yellow soil under single-rice cropping system

机肥抑制了棒头草、萹蓄等的发生危害,使早熟禾上升为优势种群;长期施用无机化肥抑制了早熟禾发生危害,常量化肥(NPK)、氮磷肥(NP)处理下日本看麦娘上升为优势种群;磷亏缺抑制了日本看麦娘的发生危害,使棒头草上升为优势种群。这可能与不同杂草的养分需求差异或土壤环境适应性有关。

## 2.2.2 对黄壤稻田冬闲田春季杂草生物量的影响

调查结果(图1)显示,长期不同施肥处理冬闲田春季田间杂草总生物量存在差异,M处理田间杂草群落总生物量最高,为 $1\ 071.24\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,较CK增加179.58%,1/2MNP处理次之,为 $929.16\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,较CK增加142.50%;CK处理最低,为 $383.16\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。各处理间不同杂草种类生物量也存在差异(表4),如在M处理中早熟禾生物量( $158.49\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )最高,棒头草生物量(未发生)最低;在NPK处理中早熟禾生物量(未发生)最低;在NK处理中棒头草生物量( $213.24\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )最高;在1/2MNP处理中日本看麦娘生物量( $197.11\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )最高;

表4 长期不同施肥处理下黄壤单季稻冬闲田春季杂草物种组成及生物量( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Table 4 Spring weeds species composition and biomass in winter fallow paddy field of yellow soil under single-rice cropping system with long-term different fertilization treatment ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )

	杂草种类 Weed species	CK	NP	PK	NK	NPK	M	1/2MNP
禾本科	棒头草 <i>Polypogon fugax</i> Nees ex Steud.	$152.18 \pm 9.18\text{ab}$	$28.53 \pm 18.85\text{c}$	$158.36 \pm 52.51\text{ab}$	$213.24 \pm 37.95\text{a}$	$44.13 \pm 16.50\text{c}$	—	$69.96 \pm 36.32\text{bc}$
	早熟禾 <i>Poa annua</i> L.	$7.20 \pm 5.02\text{b}$	$0.62 \pm 0.62\text{b}$	$0.53 \pm 0.53\text{b}$	—	—	$158.49 \pm 70.67\text{a}$	$33.60 \pm 5.81\text{b}$
	日本看麦娘 <i>Alopecurus japonicus</i> Steud.	$38.22 \pm 16.19\text{bc}$	$104.00 \pm 5.60\text{b}$	$37.51 \pm 11.10\text{bc}$	$10.58 \pm 6.16\text{c}$	$106.84 \pm 48.96\text{b}$	$97.42 \pm 27.18\text{b}$	$197.11 \pm 32.51\text{a}$
菊科	小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	$38.13 \pm 9.27\text{c}$	$35.33 \pm 8.94\text{c}$	$43.07 \pm 2.40\text{c}$	$23.16 \pm 1.86\text{c}$	$15.91 \pm 5.56\text{c}$	$171.11 \pm 67.00\text{b}$	$318.62 \pm 50.62\text{a}$
	稻槎菜 <i>Lapsana apogonoides</i> Maxim.	$10.89 \pm 2.49\text{c}$	$16.62 \pm 5.49\text{c}$	$7.51 \pm 3.42\text{c}$	$39.96 \pm 2.53\text{ab}$	$45.38 \pm 6.64\text{a}$	$21.87 \pm 7.99\text{bc}$	$24.76 \pm 11.94\text{abc}$
	泥胡菜 <i>Hemistepta lyrata</i> (Bunge) Bunge.	$2.93 \pm 2.18\text{b}$	$13.96 \pm 4.53\text{ab}$	$9.47 \pm 4.53\text{b}$	$5.47 \pm 1.35\text{b}$	$13.20 \pm 4.68\text{ab}$	$26.04 \pm 7.56\text{a}$	$14.58 \pm 5.41\text{ab}$
	鼠麴草 <i>Gnaphalium affine</i> D.Don.	$1.51 \pm 1.38\text{a}$	—	$1.42 \pm 0.62\text{a}$	$1.29 \pm 1.16\text{a}$	$0.44 \pm 0.44\text{a}$	$0.27 \pm 0.27\text{a}$	$1.60 \pm 0.92\text{a}$
	钻叶紫菀 <i>Aster subulatus</i> Michx.	$3.29 \pm 0.96\text{a}$	$3.47 \pm 1.82\text{a}$	$2.13 \pm 0.63\text{a}$	$2.80 \pm 1.35\text{a}$	$3.07 \pm 2.43\text{a}$	$6.22 \pm 5.57\text{a}$	$4.84 \pm 3.18\text{a}$
蓼科	萹蓄 <i>Polygonum aviculare</i> L.	$24.62 \pm 0.46\text{b}$	$23.33 \pm 5.08\text{b}$	$71.38 \pm 35.93\text{a}$	$18.93 \pm 6.05\text{b}$	$18.09 \pm 3.09\text{b}$	—	$4.36 \pm 3.96\text{b}$
	皱叶酸模 <i>Rumex crispus</i> L.	$80.67 \pm 23.38\text{b}$	$275.29 \pm 101.84\text{ab}$	$135.11 \pm 40.91\text{b}$	$62.62 \pm 26.29\text{b}$	$95.56 \pm 15.90\text{b}$	$420.89 \pm 137.23\text{a}$	$128.80 \pm 9.03\text{b}$
十字花科	芥 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	—	—	$0.58 \pm 0.58\text{a}$	—	—	—	—
石竹科	牛繁缕 <i>Malachium aquaticum</i> (L.) Fries( <i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.).	$3.11 \pm 1.60\text{b}$	$23.69 \pm 6.56\text{b}$	$16.09 \pm 1.38\text{b}$	$2.22 \pm 1.40\text{b}$	$23.56 \pm 4.93\text{b}$	$90.09 \pm 80.80\text{a}$	$61.82 \pm 22.46\text{a}$
玄参科	通泉草 <i>Mazus japonicus</i> (Thunb.) O. Kuntze.	$4.76 \pm 1.69\text{b}$	$0.27 \pm 0.15\text{b}$	$2.49 \pm 0.97\text{b}$	$0.36 \pm 0.36\text{b}$	$0.62 \pm 0.62\text{b}$	$0.62 \pm 0.62\text{b}$	$19.47 \pm 8.45\text{a}$
毛茛科	扬子毛茛 <i>Ranunculus sieboldii</i> Miq.	$13.51 \pm 5.47\text{c}$	$37.47 \pm 4.18\text{bc}$	$41.38 \pm 2.25\text{b}$	$29.11 \pm 9.91\text{bc}$	$31.60 \pm 8.55\text{bc}$	$71.42 \pm 13.80\text{a}$	$39.16 \pm 7.85\text{bc}$
紫草科	附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i> (Trev.) Benth. ex Baker et Moore.	$1.82 \pm 0.24\text{a}$	$2.62 \pm 0.9\text{a}$	$3.87 \pm 1.20\text{a}$	$0.27 \pm 0.27\text{a}$	$21.11 \pm 20.45\text{a}$	$4.40 \pm 2.20\text{a}$	$9.11 \pm 2.38\text{a}$
蔷薇科	朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i> L.	$0.31 \pm 0.31\text{a}$	$0.80 \pm 0.43\text{a}$	$1.56 \pm 0.50\text{a}$	$0.53 \pm 0.31\text{a}$	$0.22 \pm 0.22\text{a}$	$1.82 \pm 1.44\text{a}$	$0.62 \pm 0.62\text{a}$
茜草科	猪殃殃 <i>Galium aparine</i> L. var. <i>tenerum</i> Gren. et Rebb.	—	—	—	—	—	$0.58 \pm 0.29\text{a}$	$1.07 \pm 1.07\text{a}$

$m^{-2}$ )最高;在NK处理中日本看麦娘生物量(10.58 g· $m^{-2}$ )最低。总体来说,长期施用有机肥有利于大部分杂草生长,不施肥或不平衡施肥条件下多数杂草生长受到一定抑制。

### 2.2.3 对黄壤稻田冬闲田春季杂草种群组成的影响

长期不同施肥处理导致冬闲田春季杂草优势种群发生改变(表5)。在CK、NPK处理下田间优势杂草(相对丰度>10%)为棒头草、日本看麦娘;在NP处理下优势杂草为日本看麦娘、小飞蓬;在PK处理下优势杂草为棒头草、小飞蓬、日本看麦娘;在NK处理下优势杂草为棒头草;在M、1/2MNP处理下优势杂草为早熟禾、日本看麦娘、小飞蓬、牛繁缕。除泥胡菜、鼠麴草、钻叶紫菀、莠外,其余杂草在长期不同施肥处理

下相对丰度存在差异。不同施肥处理下优势杂草种类发生变化,如M处理下棒头草、萹蓄等未发生,早熟禾上升为优势种群,NPK处理下早熟禾未发生,日本看麦娘上升为优势种群。

### 2.3 长期不同施肥处理下黄壤稻田冬闲田春季杂草生物多样性指数

由表6可知,PK处理的物种数(14.33)、丰富度指数(4.71)、群落多样性指数(1.84)、均匀度指数(0.65)均最高,优势度指数(0.24)最低;NK处理的优势度指数(0.55)最高,丰富度指数(3.65)、群落多样性指数(1.09)、均匀度指数(0.39)最低。与CK处理相比,PK、1/2MNP处理的物种数、丰富度指数、群落多样性指数、均匀度指数上升,优势度指数下降;NP处理的

表5 长期不同施肥处理水稻田冬闲季杂草相对丰度(%)

Table 5 Relative abundance(RA) of weeds in winter fallow paddy field with long-term different fertilization treatments(%)

杂草种类 Weed species	CK	NP	PK	NK	NPK	M	1/2MNP
棒头草	33.70±3.43ab	6.03±3.56d	23.29±5.17bc	42.59±3.96a	15.54±5.76cd	—	8.08±4.11d
早熟禾	5.60±0.52b	5.42±0.55b	4.84±0.34b	5.33±0.55b	4.68±0.96b	26.42±7.45a	10.74±0.92b
日本看麦娘	12.16±3.99bc	34.49±3.53a	11.91±2.41bc	6.18±3.09c	33.78±3.16a	18.12±4.31b	22.86±3.35b
小飞蓬	9.55±0.76ab	10.47±1.23ab	14.09±0.24ab	9.42±0.38ab	7.81±1.35b	12.91±4.60ab	14.69±1.32a
稻槎菜	4.54±1.11bcd	4.68±0.36bc	2.09±0.63d	8.31±0.58a	6.56±0.31ab	4.85±1.02bc	3.08±1.02cd
泥胡菜	2.07±1.49a	4.76±0.58a	3.35±1.32a	2.41±0.59a	4.23±0.85a	3.39±1.34a	2.80±0.88a
鼠麴草	1.85±1.38a	—	1.74±0.34a	0.91±0.47a	0.35±0.35a	0.38±0.38a	1.35±0.81a
钻叶紫菀	2.13±0.92a	1.10±0.62a	0.72±0.36a	2.58±1.18a	1.15±0.63a	1.33±0.79a	1.90±0.95a
萹蓄	6.27±0.45a	6.36±0.34a	7.51±0.90a	7.01±0.94a	6.15±0.36a	—	1.35±0.84a
皱叶酸模	5.78±0.81bc	7.90±0.59ab	5.97±0.19bc	7.16±0.63abc	6.34±0.58bc	8.78±0.97a	5.59±0.40c
莠	—	—	0.33±0.33	—	—	—	—
牛繁缕	3.90±1.95b	7.54±1.15ab	8.41±0.69a	4.01±2.03b	7.68±0.35ab	10.66±1.01a	10.29±1.24a
通泉草	4.11±1.12ab	1.03±0.57bc	3.29±1.28abc	0.88±0.88bc	1.42±1.42bc	0.42±0.42c	5.51±1.36a
扬子毛茛	5.42±1.73ab	4.15±1.39abc	4.50±1.39abc	2.03±0.45bc	1.70±0.19c	7.56±0.64a	6.17±0.31a
附地菜	2.26±0.52ab	4.35±1.69a	4.35±0.68a	0.39±0.39b	2.20±1.22ab	3.89±0.53a	3.88±0.76a
朝天委陵菜	0.67±0.67b	1.71±1.20ab	3.59±0.90a	0.80±0.40b	0.41±0.41b	0.84±0.42b	0.41±0.41b
猪殃殃	—	—	—	—	—	0.46±0.41a	1.29±0.63a

表6 长期不同施肥处理下黄壤稻田冬闲田杂草群落结构特征

Table 6 Structural characteristic of weeds community in yellow-soil winter fallow paddy field under different fertilization treatments

处理 Treatment	物种数 Species	Margalef物种丰富度指数 Margalef richness index	Shannon-Wiener群落多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index	Simpson优势度指数 Simpson dominance index
CK	13.33±1.20a	4.35±0.42a	1.46±0.18ab	0.51±0.06ab	0.38±0.06ab
NP	12.00±1.53a	3.88±0.54a	1.48±0.15ab	0.52±0.05ab	0.38±0.06ab
PK	14.33±0.67a	4.71±0.24a	1.84±0.12a	0.65±0.04a	0.24±0.04b
NK	11.33±1.20a	3.65±0.42a	1.09±0.22b	0.39±0.08b	0.55±0.09a
NPK	11.33±0.89a	3.65±0.31a	1.34±0.06ab	0.47±0.02ab	0.41±0.02ab
M	11.67±0.33a	3.76±0.12a	1.46±0.17ab	0.52±0.06ab	0.34±0.09b
1/2MNP	13.67±0.33a	4.47±0.12a	1.79±0.14a	0.63±0.05a	0.23±0.04b

群落多样性指数、均匀度指数上升,物种数、丰富度指数下降,优势度指数未发生变化;M处理的均匀度指数上升,物种数、丰富度指数、优势度指数下降,群落多样性指数未发生变化;NK、NPK处理的优势度指数上升,物种数、丰富度指数、群落多样性指数、均匀度指数下降。各处理的物种数、丰富度指数之间差异不显著,PK、1/2MNP处理的群落多样性指数、均匀度指数显著高于NK处理,NK处理的优势度指数显著高于1/2MNP、PK、M处理。由于试验田不是完全封闭场所,不同施肥处理的物种数与CK处理不完全是包含关系,甚至多于CK处理,这可能是周围环境杂草种子随气流等传播到试验田造成的。

#### 2.4 黄壤稻田冬闲田春季杂草密度与土壤养分因子的关系

采用冗余分析解析土壤理化性质对杂草密度的影响,结果(图2)表明不同施肥处理杂草密度明显不同,1/2MNP处理与M处理相似,CK处理与NK处理相似,NP、PK处理与NPK处理相似。图2显示,RDA分析的第一轴、第二轴解释度分别为47.56%和9.95%,解释度合计为57.51%。土壤养分对杂草密度影响依次为土壤全氮>碱解氮>全磷>速效钾>pH>有机质>有效磷>全钾>速效钾,其中全氮( $TN: 42.8\%, F=10.4, P=0.002$ )、碱解氮( $TN: 10.4\%, F=4.0, P=0.002$ )和全磷( $TN: 4.8\%, F=1.9, P=0.05$ )是影响杂草密度的关键因

子。1/2MNP处理和M处理的杂草密度在pH上的投影在负方向,其他处理则在正方向上,在全氮等养分上的投影相反,说明有机肥施用通过降低pH和提升土壤养分与其他施肥处理形成差异。全氮、碱解氮与早熟禾、猪殃殃、小飞蓬、皱叶酸模、牛繁缕、日本看麦娘和附地菜呈明显锐角,为正相关关系,与其他杂草呈负相关关系,pH则相反。

### 3 讨论

休耕田杂草是农田休闲期土壤速效养分的持久保持者,因此研究黄壤单季稻冬闲田春季杂草群落结构,对农田养分的生物截获、生物多样性保护和农田杂草的高效综合防治具有重要意义。贵州作为黄壤单季稻生产区,其春季杂草还田具有绿肥功效,对稳定土壤养分及循环、维持土壤肥力、促进水稻稳产高产发挥着重要作用。

大量研究证明长期施肥可改变杂草群落物种组成,抑制杂草生长并降低危害程度。本研究结果表明,长期不同施肥措施改变了土壤养分状况及土壤环境,从而导致杂草种类、密度、生物量、群落结构及生物多样性的变化,这与前人研究基本一致<sup>[23-26]</sup>。这些变化为黄壤单季稻冬闲田春季杂草田间综合管理及应用提供了较好的理论支撑。本研究发现长期施用有机肥处理区棒头草未发生,而缺磷(NK)处理区棒头草发生密度为591.11株·m<sup>-2</sup>;不施肥处理区(CK)棒头草发生密度为506.67株·m<sup>-2</sup>,是该处理区的优势杂草,其余处理区棒头草有不同程度发生,说明长期施用有机肥能较好地抑制棒头草等发生危害。在长期缺磷(NK)、平衡施用无机化肥(NPK)处理区早熟禾未发生,而长期单施有机肥(M)处理区早熟禾发生密度为586.67株·m<sup>-2</sup>,1/2有机肥替代1/2化肥(1/2MNP)处理区早熟禾发生密度为126.67株·m<sup>-2</sup>,不施肥处理区(CK)早熟禾发生密度为17.33株·m<sup>-2</sup>,其余长期无机化肥施用区早熟禾发生较少,说明长期无机化肥施用能显著抑制早熟禾等发生危害。缺磷(NK)处理区日本看麦娘发生密度为36.00株·m<sup>-2</sup>,显著低于其他处理,说明磷亏缺有利于抑制日本看麦娘等发生危害。本研究还发现不同处理对杂草种类的影响存在显著差异,这可能是不同杂草对环境适应性(如pH变化等)不同以及养分需求和吸收利用能力差异所致,但具体是何种因素主导杂草群落演替仍需进一步研究。如果是土壤养分变化主导杂草群落演替,可能是杂草种类对养分需求差异的表现,因此利用杂

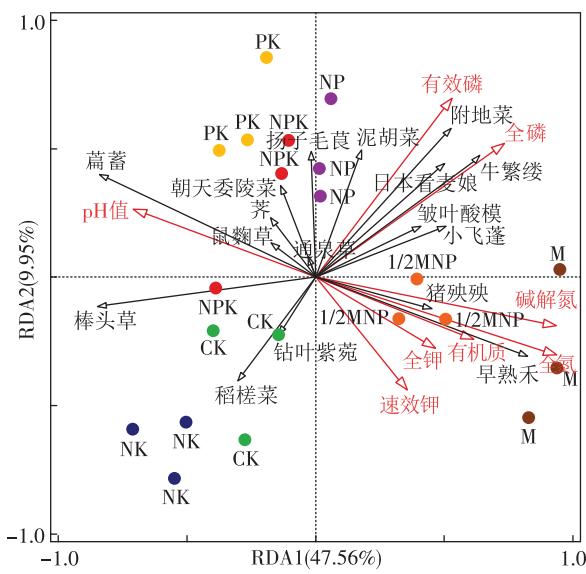


图2 长期不同施肥处理土壤理化性质与杂草密度的RDA二维序列图

Figure 2 The RDA 2-dimension sequence plot of soil physicochemical properties and weed density treated with long-term different fertilization

草物种多样性或选择具有富集养分功能的植物进行绿肥还田调控或维持土壤养分平衡,对促进深层土壤营养物质转移到土壤上层供作物吸收具有重要意义。长期施用有机肥不仅提升了黄壤土肥力,还能抑制贵州夏熟作物田优势杂草棒头草的发生危害,实现田间土壤培肥和控草等多重生态效益,有利于促进农田生态系统的可持续高效发展。因此,生产上可根据田间杂草发生情况合理选择相应的施肥措施控制田间杂草危害,同时也可培育春季杂草或构建功能性植物多样性还田,充分利用冬闲季光热资源获取更多杂草生物量,促进土壤养分的良性循环,维持土壤肥力的稳定性。

由于不同杂草对养分的需求和响应存在差异,氮、磷、钾养分施用的种类显著影响农田杂草群落。本研究分析表明全氮、碱解氮和全磷是影响杂草密度的关键因子,这与蒋敏等<sup>[27]</sup>得到的影响稻田杂草分布的土壤养分因子主要为氮、磷和有机质的结果相一致。同时,本研究还表明缺氮导致杂草群落多样性指数增加、优势度指数降低,物种群落结构相对复杂;缺磷导致杂草群落多样性指数降低、优势度指数增加,物种群落结构相对简单。这与董春华等<sup>[20]</sup>的研究结果相一致,其研究发现影响杂草种类发生的关键因素是磷,而决定优势杂草群落的主要因素是氮素;但与施林林等<sup>[28]</sup>的研究中氮磷亏缺导致杂草群落多样性高于氮磷钾均衡施肥的结论存在一定差异,这可能是不同区域气候环境、耕作制度、杂草群落及其动态变化等因素差异引起的。

农田生态环境是一个复杂的生态系统,杂草发生与土壤理化性质、农田微生态、气候环境、作物种类及种植制度等密切相关。本试验研究了贵州黄壤稻田24年长期不同施肥措施对春季杂草群落的影响,结果表明科学合理施肥不仅可以提升土壤肥力,而且能抑制农田杂草的危害。但其抑制机理仍需进一步研究,以更好地发挥合理施肥对黄壤稻田优势杂草的抑制作用,选择具有富集养分功能的植物进行绿肥还田,进而调控或维持土壤养分平衡,促进深层土壤营养物质转移到土壤上层供作物吸收,促进土壤养分良性循环。

## 4 结论

(1)田间合理施肥可改善土壤理化性状,改变杂草群落结构,有利于控制田间杂草发生危害;长期合理施用有机肥有利于提升土壤肥力,同时抑制夏熟作

物田棒头草等优势杂草的危害。

(2)春季杂草作为绿肥还田,能较好地稳定土壤肥力及物种多样性,促进农业生态系统发挥出最大生态效应。

## 参考文献:

- [1] LAMBERS H, MOUGEL C, JAILARD B, et al. Plant–microbe–soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2):83–115.
- [2] MOREAU D, PIVATO B, BRU D, et al. Plant traits related to nitrogen uptake influence plant–microbe competition[J]. *Ecology*, 2015, 96(8): 2300–2310.
- [3] HOOPER D U, VITOUSEK P M. Effects of plant composition and diversity on nutrient cycling[J]. *Ecological Monographs*, 1988, 68(1): 121–149.
- [4] 何秋虹, 杨知建, 肖润林. 农田生态控草技术研究进展[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(增刊1): 59–63. HE H Q, YANG Z J, XIAO R L. Review of studies on weed ecological control of farmland[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2009, 35(Suppl 1):59–63.
- [5] EISENHAUER N, BELER H, ENGEL C, et al. Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis[J]. *Ecology*, 2010, 91(2):485–496.
- [6] 黄兴成, 李渝, 叶照春, 等. 黄壤性稻田稗草发生特征及其对长期不同施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12):4029–4036. HUANG X C, LI Y, YE Z C, et al. Occurrence characteristics of *Echinochloa* and its response to long-term fertilization in paddy fields of yellow soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12):4029–4036.
- [7] 杨颖楠, 黄明斌. 长期不同施肥处理对不同土层土壤水力性质的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1):56–62. YANG Y N, HUANG M B. Effects of different long-term fertilization treatments on soil hydraulic properties and their changes with depth[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1):56–62.
- [8] 柳开楼, 都江雪, 邬磊, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6):1115–1123. LIU K L, DU J X, WU L, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus distribution in soil aggregates of different depths in paddy fields[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6):1115–1123.
- [9] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 等. 长期施肥下农田土壤–有机质–微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. 生态学报, 2018, 38(11):3848–3858. WANG C J, WANG Q Q, XU H, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11):3848–3858.
- [10] 周琼, 周颖杰, 马建芳. 长期施肥对水稻田土壤养分含量的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(12):2525–2529, 2540. ZHOU Q, ZHOU Y J, MA J F. Effect of long-term fertilization on soil nutrient content in rice field[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(12):2525–2529, 2540.

- [11] 罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 等. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 740–748. LUO X Q, HAO X H, CHEN T, et al. Effects of long-term different fertilization on microbial community functional diversity in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 740–748.
- [12] 徐一兰, 唐海明, 肖小平, 等. 长期施肥对双季稻田土壤微生物特性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5847–5855. XU Y L, TANG H M, XIAO X P, et al. Effects of different long-term fertilization regimes on the soil microbiological properties of a paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5847–5855.
- [13] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7668–7678. TANG H M, XIAO X P, TANG W G, et al. Effects of long-term fertilizer treatments on CH<sub>4</sub> fluxes and key functional microorganisms in a double-cropping paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7668–7678.
- [14] 蒋敏, 黄年生, 张小祥, 等. 施肥对农田杂草生理生态及群落形成的影响综述[J]. 杂草学报, 2016, 34(4): 1–6. JIANG M, HUANG N S, ZHANG X X, et al. Effects of fertilization on eco-physiology and community formation of weed in croplands: a review[J]. *Journal of Weed Science*, 2016, 34(4): 1–6.
- [15] 张海艳, 朱荣松, 孙国俊, 等. 不同施肥方式对稻麦轮作制稻田杂草群落的影响[J]. 杂草学报, 2016, 34(1): 50–55. ZHANG H Y, ZHU R S, SUN G J, et al. Effects of fertilization regimes on weed communities in rice fields under a rice-wheat cropping system[J]. *Journal of Weed Science*, 2016, 34(1): 50–55.
- [16] 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 Fertilizers*, 2015, 21(1): 200–210.
- [17] 冯伟, 潘根兴, 强胜, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作田土壤杂草种子库多样性的影响[J]. 生物多样性, 2006, 14(6): 461–469. FENG W, PAN G X, QIANG S, et al. Influence of long-term fertilization on soil seed bank diversity of a paddy soil under rice/rape rotation [J]. *Biodiversity Science*, 2006, 14(6): 461–469.
- [18] WAN K Y, TAO Y, LI R H, et al. Influences of long-term different types of fertilization on weed community biodiversity in rice paddy fields[J]. *Weed Biology and Management*, 2012, 12(1): 12–21.
- [19] 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, 2012, 20(5): 573–577. LIN X J, WANG F, WANG C F, et al. Effects of long-term fertilization on weed community characteristics and carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during winter-spring season in yellow-clay paddy fields of south China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 573–577.
- [20] 董春华, 曾希柏, 文石林, 等. 长期施肥对红壤双季稻冬闲田春季杂草群落的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1150–1157. DONG C H, ZENG X B, WEN S L, et al. Effects of long-term fertilization on spring season weed community in winter fallow paddy field in red soil area under double-rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1150–1157.
- [21] 张志铭, 黄绍敏, 叶永忠, 等. 长期不同施肥方式对麦田杂草群落结构及生物多样性的影响[J]. 河南农业科学, 2010(6): 67–70. ZHANG Z M, HUANG S M, YE Y Z, et al. The effects of long term different fertilization on community and biodiversity of crop weeds[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010(6): 67–70.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] 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, 2005, 13(3): 57–59. YIN L C, CAI Z C. The change of the weed biodiversity in wheat field under a long term located fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 57–59.
- [24] 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. MA T, TONG Y F, LIU J X, et al. Relationships of species diversity and productivity under the fertilization levels in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Grassland and Lawn*, 2008(4): 34–38.
- [25] 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. LI R H, QIANG S, QIU D S, et al. Effects of long-term fertilization regimes on weed communities in paddy fields under rice-oilseed rape cropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3236–3243.
- [26] 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. JIANG M, SHEN M X, SHEN X P, et al. Effect of long-term fertilization pattern on weed community diversity in wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7): 1746–1756.
- [27] 蒋敏, 沈明星, 沈新平, 等. 长期不同施肥方式对稻田杂草群落的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1748–1756. JIANG M, SHEN M X, SHEN X P, et al. Effect of long-term fertilization pattern on weed community diversity in rice field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1748–1756.
- [28] 施林林, 沈明星, 蒋敏, 等. 长期不同施肥方式对稻麦轮作田杂草群落的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 310–316. SHI L L, SHEN M X, JIANG M, et al. Effect of long-term different fertilization management on weed community in rice-wheat rotation field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(2): 310–316.