

垄作稻鱼鸡共生对水稻根系生长性状的影响

梁玉刚^{1,2,3}, 陈奕沙⁴, 陈璐^{1,2,3}, 孟祥杰^{1,2,3}, 陈灿^{1,2,3}, 黄璜^{1,2,3}, 余政军^{1,2,3}

(1. 湖南农业大学 农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 农业农村部华中地区作物栽培科学观测试验站, 湖南 长沙 410128;
3. 湖南省稻田生态种养工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128; 4. 湖南农业大学 经济学院, 湖南 长沙 410128)

摘要:为了探究水稻垄作栽培和稻鱼鸡共生模式的结合对水稻根系生长性状的影响,在总结前人垄作栽培、稻鱼和稻鸡共生技术的研究基础上,创新提出了水稻垄作栽培养鸡、养鱼的种养结合技术,通过设计常规水稻垄作栽培(CK)、水稻垄作养鱼(RF)、水稻垄作养鸡(RC)和水稻垄作养鸡养鱼(RFC)的田间对比试验,研究了垄作稻鱼鸡共生模式下水稻根系生长性状和生理活性的特征。结果表明:2 a中垄作稻鱼鸡共生不同处理间水稻根系形状结构和生理活性存在一定差异。RFC和RC处理间的水稻根干物质、根冠比、根体积、根数、最长根长及齐穗后的根系氧化活力和伤流液等指标差异不显著,二者略优于CK(部分指标差异显著),其中根系体积较CK分别增加0.77%~14.05%和0.10%~13.88%,根系氧化活力较CK分别增加2.15%~13.48%和0.64%~10.05%;RF处理下水稻根系形态各构成指标、根系氧化活力和根伤流液均较CK显著降低,其中根系干物质、根系体积、根系氧化活力和根系伤流液减幅分别为24.62%~50.70%,7.80%~47.45%,10.49%~21.68%,24.39%~39.25%。综上所述,垄作稻鱼鸡和垄作稻鸡共生模式下,水稻根系体积、根冠比、根数和最长根长等形态指标整体高于水稻常规垄作栽培,并且齐穗后的根系生理活性得到提高,利于减缓水稻后期根系的衰老,从而为水稻地上部生长和产量的形成奠定基础。

关键词:水稻;垄作;稻鱼鸡共生;根系干物质;根数;根系氧化活力

中图分类号:S511.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)05-0089-09

doi:10.7668/hbxb.20191165



Effect of Rice-fish-chicken Ridge Cultivation on the Growth of the Rice Root System

LIANG Yugang^{1,2,3}, CHEN Yisha⁴, CHEN Lu^{1,2,3}, MENG Xiangjie^{1,2,3},
CHEN Can^{1,2,3}, HUANG Huang^{1,2,3}, YU Zhengjun^{1,2,3}

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Observation Station of Crop Cultivation Science in Central China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410128, China;
3. Hunan Rice Field Ecological Breeding Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, China;
4. Economic College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: This research studies the effect of the combination of rice ridge cultivation and rice-fish-chicken cultivation on the growth of the rice root system. On the basis of the researches carried out by other scholars on rice ridge cultivation, rice-fish cultivation, and rice-chicken cultivation, this research came up with a creative planting and breeding technique that features combining chicken and fish breeding with rice ridge cultivation. This research was based on a field comparison experiment that consisted of conventional rice ridge cultivation (CK), rice ridge cultivation with fish breeding (RF), rice ridge cultivation with chicken breeding (RC), and rice ridge cultivation with fish and chicken breeding (RFC). The growth trait and biological activity of the rice root system under rice-fish-chicken ridge cultivation was explored. The results showed that there were differences in the structure and biological property of the roots among different cultivation models during the two-year experiment. RFC and RC had no insignificant differences in root dry matter, root shoot ratio, root volume, root number, maximum root length, and

收稿日期:2020-06-02

基金项目:国家重点研发项目(2018YFD0301003);湖南省教育厅科学研究项目(18C0132)

作者简介:梁玉刚(1990-),男,安徽淮北人,在读博士,主要从事作物高效栽培与生态信息研究。

通讯作者:黄璜(1958-),男,湖南长沙人,教授,博士,主要从事农业生态研究。

余政军(1982-),男,湖南长沙人,中级实验师,硕士,主要从事作物高效栽培与生态信息研究。

root antioxidant activity and bleeding sap after full heading, which were slightly higher than CK (some indicators had significantly difference). Compared with CK, the root volume of RFC and RC was increased by 0.77% – 14.05% and 0.10% – 13.88% respectively, and the antioxidant activity was increased by 2.15% – 13.48% and 0.64% – 10.05% respectively. Compared to CK, RF showed a downward trend of all indexes related to the root structure, the antioxidant activity, and bleeding sap, in which the root dry matter, root volume, the antioxidant activity, and bleeding sap were reduced by 24.62% – 50.70%, 7.80% – 47.45%, 10.49% – 21.68% and 24.39% – 39.25% respectively. In conclusion, rice-fish-chicken ridge cultivation and rice-chicken ridge cultivation had a higher level in root morphological index compared with conventional rice ridge cultivation, such as root volume, root shoot ratio, root number and maximum root length. The biological activity of root system was improved after full heading stage and the aging of the root system at later stage was reduced, thus ensuring the growth of the overground parts of the rice and its yield.

Key words: Rice; Ridge cultivation; Rice-fish-chicken cultivation; Root dry matter; Root number; Root antioxidant activity

我国水稻常年种植面积约 0.3 亿 hm^2 , 总产量约占全国粮食总产量的 40%, 约有 65% 的人口以稻米为主食, 保持水稻稳产与增产对国家粮食安全与社会稳定具有重要意义^[1-2]。水稻稳产与高产很大程度上取决于植株根系保持良好的形态结构以及较高的生理活性, 根系不仅是激素、氨基酸和有机酸等有机物质合成的重要部位, 也是吸收水分和养分的重要器官^[3], 同时根系保持良好的形态结构以及较高的生理活性有利于地上部的生长和产量的增加^[4]。水稻根系形态主要是由一次不定根和各级分枝的侧根等在土壤空间的分布和构成所决定的^[5], 其中根系干物质、根冠比、根数、根长、根体积、根直径等指标是根系形态的重要构成部分, 根系形态能够影响根系有机物质合成、物质转运和生理活性等的强弱, 进而影响作物地上部的生长发育和产量的形成^[6]。水稻根系生理活性可以用根系氧化活力、根系伤流液、根系酶活性、根系分泌物等指标进行判断, 其中根系氧化活力作为评判根系生理活性强弱的重要指标, 其强弱与水稻根系酶活性和代谢强度密切相关, 也是水稻地上部高生物量持续积累和生育后期保持叶片较高的光合速率, 获得高产的保障^[7]。前人研究表明, 垄作栽培能增加作物根长密度、根表面积和比根长^[8], 促进根系生长^[9], 提高根系活力、根系生长量和根系脲酶与转化酶的活性^[10], 根系更为发达且多分布在土壤表层^[11], 有利于根系对土壤养分的吸收^[12-13]。水稻根系形态结构的改善和生理活性的提高, 利于减缓植株衰老, 促进水稻籽粒灌浆结实, 从而有利于产量的增加^[14]。尤其是水稻生育后期, 此时也正是根系活性走向衰老的时期, 因此, 采取适当的调控措施延缓水稻生育后期的根系衰老, 对水稻产量形成和籽粒灌浆具有重要意义。

垄作栽培作为我国农业耕作上的两大体系之

一^[15], 现已广泛应用于多种农作物的生产, 如小麦、玉米、马铃薯、水稻、大豆、油菜等, 并获得了较好的增产效果^[16]。众多学者研究表明, 垄作栽培技术优势主要表现在: 培肥土壤、提高肥料利用率、增温保湿、提高水分利用率、利于农田生态系统碳汇形成、提高光合能力、使作物的生长环境得到协调, 促进作物生长, 利于作物稳产及增产^[16-20]。稻鱼共生模式在我国有着悠久的历史, 几乎与稻作发展史一样悠久^[21], 前人对稻鱼共生模式的基础理论、内在作用机理及技术研发、应用与推广等方面做了大量研究, 领域涵盖水稻生长发育、经济效益、土壤结构与质量、生物多样性、抗病除草、水体环境质量和温室气体排放等^[22-24]。目前, 有关垄作栽培养鸡养鱼下根系形态结构和生理活性的研究甚少。为此, 本研究通过垄作稻鱼鸡共生、垄作稻鸡共生、垄作稻鱼共生和常规水稻垄作栽培的田间对比试验, 调查水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期、乳熟期和成熟期的根系形态结构和生理活性等相关指标, 探究垄作稻鱼鸡共生下水稻根系形态结构与生理活性的变化规律, 从而为水稻垄作栽培养鸡养鱼模式提供一定理论科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验分别于 2018, 2019 年 5 – 10 月在湖南省长沙县路口镇明月村 (28°40'38"N, 113°29'48"E) 科研示范基地进行。该地区属于亚热带季风湿润气候, 雨水充沛, 无霜期长, 土壤相对肥沃, 以种植双季稻为主。水稻品种为农香 32, 湖南省农业科学院水稻所选育; 鱼的品种为工程鲫鱼, 鸡的品种为湖南本地麻鸡; 复合肥料的养分含量为 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 15:15:15$, 总养分 $\geq 45\%$; 尿素的养分含量为总氮

含量 $\geq 46.40\%$ 。

1.2 试验设计

试验采取随机区组设计, 设水稻垄作养鸡养鱼 (RFC)、水稻垄作养鱼 (RF)、水稻垄作养鸡 (RC) 和常规水稻垄作栽培 (CK) 4 个处理, 3 次重复, 共 12 个小区, 小区长 20 m, 宽 6 m, 小区面积 120 m²。水稻移栽前, 4 个处理均采用起垄机起垄, 于起垄前基施复合肥料 720 kg/hm²。起垄前 1 d, 稻田灌水, 水层保持 2 cm 左右为宜。起垄规格 (图 1) 为: 垄肩与垄肩之间的距离 120 cm, 垄底与垄底之间的距离 20 cm, 垄顶距垄底的高度 45 cm, 单垄一侧宽 50 cm。2018, 2019 年分别于 6 月 16 日和 5 月 5 日育秧, 7 月 8 日和 5 月 30 日移栽, 水稻移栽于垄沟两侧 (垄沟一侧肩膀和中部各一行), 并保持株距为 25 cm, 行距为 20 cm, 每穴 4 株。CK 处理采用化学除草剂控制田间杂草, RF、RC 和 RFC 处理均不喷施除草剂。CK 处理除草剂喷施 48 h 后, 小区灌水 (以不淹没水稻心叶为宜), 同时 10 d 内严防各小区串水。投放鸡鱼前 7 d, 每小区追施尿素, 尿素用量为

155 kg/hm²。水稻整个生育期内, 肥料总用量为纯 N 180 kg/hm², P₂O₅ 108 kg/hm² 和 K₂O 108 kg/hm²。水稻投放鱼苗前, 沟中水位保持在 15~20 cm 左右; 投放鱼苗后, 沟中水位整体保持在 30 cm 以上, 结合水稻分蘖实际情况适当增减水位; 晒田及水稻收获前 7 d 沟中水位保持在 10 cm 左右。水稻插秧 15 d, RFC 和 RF 处理投放 5~8 cm 长的鲫鱼 6 000 尾/hm², 配养草鱼 600 尾/hm²。RFC 和 RC 处理投放 30 日龄个体质量 350 g 左右的鸡苗 900 只/hm²。养鸡和养鱼处理采用尼龙网、竹竿、铁丝等构建防逃防敌害设施, 且于小区合理位置搭建鸡棚以供鸡休息和投喂食料。投放前期采用人工投喂稻谷引导鸡在田中均匀作业, 每天检查田间设施以及观察鸡、鱼活动和水质等情况, 并严防鸡鱼外逃和天敌对鸡鱼的伤害。水稻收获前将鸡收回, 稻鸡、稻鱼共育时间约为 80 d。水稻收获后, 将沟中水位加深至 35 cm 左右, 使鱼继续养殖于垄沟中, 11 月中旬将鱼收回 (大气平均温度低于 15 ℃)。

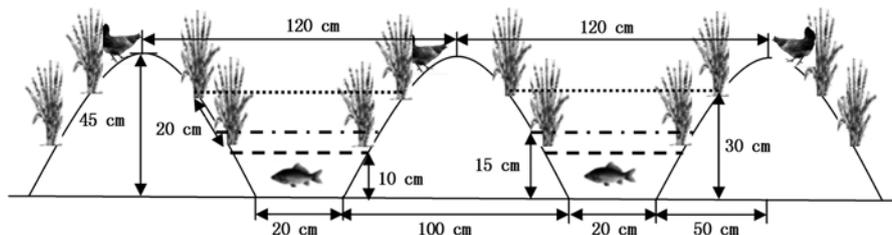


图 1 垄作稻鱼鸡共生示意图

Fig. 1 Diagram of rice-fish-chicken symbiosis pattern under ridge cultivation

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态调查 2018, 2019 年均于水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期、乳熟期和成熟期进行取样, 每小区分别取代表性植株 5 蔸和 3 蔸。每次取样前先用取样铲在稻田挖出水稻根系生长的剖面图, 即在水稻根系周围挖长 30 cm, 坡宽 25 cm, 深 45 cm, 用以观察水稻根系在土壤中大致生长范围, 以此在水稻取样时尽最大程度减少对水稻根系的损坏。取样完成后于田间做简单处理后带回实验室, 用剪刀将水稻茎基部剪断 (茎与根的连接处), 并将水稻茎秆、叶片和穗分离, 并单独装袋, 于 105 ℃ 杀青 30 min, 80 ℃ 下烘干 48 h, 测定地上部茎、叶和穗干物质积累量。随后小心清除根系所带泥巴, 并用清水快速将根系洗净, 调查每蔸根系长度、根系体积、根系总数等, 其中根系长度为最长根长 (根基至根尖的长度), 根系总数采用人工数取, 根系体积采用排水法测定, 根系干物质采用 105 ℃ 杀青 30 min, 80 ℃ 烘干至恒质量, 称质量。水稻每蔸茎秆、叶片

和穗的干物质质量之和即为每蔸地上部总干物质质量, 每蔸地上部总干物质质量与每蔸根系质量的比值即为根冠比。

1.3.2 根系生理性状调查 根系氧化活力: 2018, 2019 年分别于齐穗期、齐穗 + 7 d 和齐穗 + 15 d, 每小区取样 3 蔸测定根系氧化活力, 水稻根系氧化活力采用 α -萘胺氧化法测定^[25]。

根伤流液: 水稻根系伤流液收集采用切断自然根压法进行收集^[26], 2018, 2019 年均于齐穗期、齐穗 + 7 d 和齐穗 + 15 d, 每小区选取 3 蔸具有平均茎蘖数的水稻植株, 距离地面约 15 cm 处用剪刀剪去植株地上部分进行伤流液收集, 收集时间为当日 18:30 - 次日 6:30, 随后带回称质量, 收集后质量和收集前质量的差值即为水稻根伤流液质量。

1.4 数据分析

数据处理和图表绘制分别在 Microsoft Excel 2007 和 Microsoft Word 2007 下进行, 采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 采用最小显著差法 (LSD) 进行

显著性检验。

2 结果与分析

2.1 垄作稻鱼鸡共生对水稻根系干物质的影响

由表 1 可知,2 a 中 4 个处理下水稻根系干物质在分蘖期 - 齐穗期均增加,齐穗期 - 成熟期均减小。2 a 中 RFC 处理下分蘖期 - 成熟期的水稻根系

干物质与 CK 差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$); RC 处理除 2019 年乳熟期显著高于 CK 外,其余时期与 CK 差异也均未达到显著水平 ($P > 0.05$); RF 处理下水稻根系干物质在分蘖期 - 成熟期均较 CK 显著降低 ($P < 0.05$),降幅 24.62% ~ 50.70%。2 a 中 RFC 和 RC 处理间水稻平均干物质在分蘖期 - 成熟期差异不显著。

表 1 不同处理的水稻根系干物质

Tab. 1 Rice root dry matter accumulation of different treatments

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		孕穗期 Booting stage		齐穗期 Full heading stage		乳熟期 Milky stage		成熟期 Maturing stage	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
	RFC	3.87 ± 0.29a	3.25 ± 0.27a	10.96 ± 0.74a	9.78 ± 0.44a	13.65 ± 0.35a	12.46 ± 0.37a	9.35 ± 0.28a	9.01 ± 0.22ab	7.80 ± 0.29a
RC	3.83 ± 0.22a	3.28 ± 0.06a	10.74 ± 0.71a	9.29 ± 0.45a	13.20 ± 0.36a	12.36 ± 0.39a	9.32 ± 0.47a	9.13 ± 0.25a	7.79 ± 0.15a	7.29 ± 0.28a
RF	2.78 ± 0.09b	2.51 ± 0.15b	7.14 ± 0.28b	6.68 ± 0.21b	8.15 ± 0.38b	7.00 ± 0.24b	4.96 ± 0.09b	4.25 ± 0.18c	4.07 ± 0.18b	3.57 ± 0.12b
CK	3.90 ± 0.38a	3.33 ± 0.29a	10.84 ± 0.36a	9.85 ± 0.37a	13.27 ± 0.46a	12.26 ± 0.26a	9.29 ± 0.21a	8.62 ± 0.37b	7.69 ± 0.16a	7.18 ± 0.16a

注:数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。表 2 - 5 同。

Note: Numbers followed by the different small letters were significantly different at 0.05, respectively. The same as Tab. 2 - 5.

2.2 垄作稻鱼鸡共生对水稻根冠比和根系体积的影响

由表 2 可知,2 a 中水稻根系体积在除 2019 年 RF 和 CK 处理外的其他处理的分蘖期 - 齐穗期均呈增加趋势,而在所有处理的齐穗期 - 成熟期均呈减小趋势,其中水稻根系体积值以 RFC 处理下齐穗期最高(2018 年 64.34 cm³,2019 年 55.05 cm³),以 RF 处理值最低(2018 年 42.12 cm³,2019 年 28.59 cm³)。2 a 中 RFC 和 RC 处理下分蘖期 - 成熟期水稻根系体积差异均不显著,且除 2018 年分蘖期外均较 CK 有所增加,增幅分别为 0.77% ~

14.05% 和 0.10% ~ 13.88%,其中在 2018 年成熟期和 2019 年齐穗期与成熟期差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); RF 处理较 CK 均呈降低趋势,降幅 7.80% ~ 47.45%,除 2018 年分蘖期外,其余时期均达到显著水平 ($P < 0.05$)。2 a 中 RFC、RC 和 CK 处理水稻根冠比在分蘖期 - 成熟期均值较 RF 处理增加,且在 2018 年分蘖期 - 成熟期和 2019 年齐穗期 - 成熟期差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); 2018 年中 RFC、RC 和 CK 处理间的根冠比无显著性差异 ($P > 0.05$),2019 年中 RFC 和 RC 处理间两者无显著差异,但整体略优于 CK 处理。

表 2 不同处理的水稻根系体积和根冠比

Tab. 2 Rice root volume and root shoot ratio of different treatments

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		孕穗期 Booting stage		齐穗期 Full heading stage		乳熟期 Milky stage		成熟期 Maturing stage	
	根体积/cm ³ Root volume	根冠比 Root shoot ratio								
	2018									
RFC	33.40 ± 2.49a	0.155 6 ± 0.005 9a	61.55 ± 5.35a	0.133 4 ± 0.004 1a	64.34 ± 3.11a	0.112 3 ± 0.001 2a	54.26 ± 3.44a	0.061 4 ± 0.000 2a	44.27 ± 1.83a	0.050 6 ± 0.001 2a
RC	32.94 ± 2.38a	0.156 1 ± 0.005 6a	61.30 ± 3.96ab	0.134 3 ± 0.004 9a	63.59 ± 2.01a	0.114 6 ± 0.003 1a	55.17 ± 2.20a	0.063 6 ± 0.003 1a	42.92 ± 1.89a	0.052 4 ± 0.000 7a
RF	30.60 ± 0.99a	0.138 5 ± 0.007 9b	41.73 ± 0.30c	0.119 8 ± 0.006 8b	42.12 ± 0.48b	0.100 4 ± 0.000 1b	33.67 ± 1.27b	0.055 1 ± 0.001 5b	28.14 ± 1.36c	0.045 2 ± 0.001 4b
CK	33.84 ± 1.51a	0.156 2 ± 0.005 3a	56.13 ± 1.64b	0.133 5 ± 0.002 2a	59.84 ± 2.31a	0.112 3 ± 0.001 6a	52.85 ± 1.94a	0.062 6 ± 0.000 7a	39.46 ± 1.70b	0.051 3 ± 0.000 7a
2019										
RFC	31.99 ± 0.09a	0.142 3 ± 0.004 3a	53.42 ± 2.82a	0.124 9 ± 0.001 2a	55.05 ± 1.77a	0.110 2 ± 0.003 4a	46.47 ± 1.84a	0.061 6 ± 0.000 2ab	39.45 ± 1.68a	0.050 7 ± 0.001 0a
RC	32.06 ± 0.35a	0.145 5 ± 0.004 1a	53.18 ± 1.30a	0.120 7 ± 0.003 1a	54.97 ± 2.63a	0.111 1 ± 0.005 6a	46.66 ± 2.35a	0.063 5 ± 0.001 2a	40.53 ± 0.72a	0.050 1 ± 0.000 5ab
RF	29.27 ± 0.39b	0.137 5 ± 0.002 7a	27.36 ± 0.94b	0.121 3 ± 0.006 2a	28.59 ± 1.12c	0.097 5 ± 0.003 5b	25.48 ± 1.10b	0.054 9 ± 0.001 7c	20.30 ± 0.62c	0.045 8 ± 0.000 3c
CK	31.75 ± 0.34a	0.144 8 ± 0.004 0a	52.96 ± 2.35a	0.125 4 ± 0.003 4a	48.27 ± 1.66b	0.108 3 ± 0.002 3a	45.02 ± 2.69a	0.059 2 ± 0.001 2b	36.83 ± 1.21b	0.049 2 ± 0.000 9b

2.3 垄作稻鱼鸡共生对水稻根数和最长根长的影响

由表 3 可知,2 a 中 RFC 和 RC 处理下分蘖期 - 成熟期水稻根数较对照有增加趋势,但除 2019 年齐穗期 RFC 与 CK 处理达到显著差异 ($P < 0.05$) 外,

其余时期处理间差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$); RF 处理水稻根数在分蘖期 - 成熟期均较 RFC、RC 和 CK 呈减少的趋势。2 a 中 4 个处理下水稻最长根长在分蘖期 - 齐穗期均增加,齐穗期 - 成

熟期均减小,以 RFC 处理在齐穗期最高(2018 年 35.67 cm,2019 年 35.72 cm),RF 处理最低(2018 年 33.45 cm,2019 年 30.73 cm)。水稻最长根长在 2018 年各时期及 2019 年分蘖期不同处理间差异均

不显著($P > 0.05$),在 2019 年孕穗期 RC 显著高于 RF($P < 0.05$),齐穗期 RFC 和 RC 显著高于 RF($P < 0.05$),乳熟期 RFC 显著高于 RF($P < 0.05$),成熟期 RFC、RC 和 CK 均显著高于 RF($P < 0.05$)。

表 3 不同处理的水稻根数和最长根长

Tab. 3 Rice root number and maximum root length of different treatments

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		孕穗期 Booting stage		齐穗期 Full heading stage		乳熟期 Milky stage		成熟期 Maturing stage	
	根数	最长根长/cm	根数	最长根长/cm	根数	最长根长/cm	根数	最长根长/cm	根数	最长根长/cm
	Root number	Maximum root length	Root number	Maximum root length	Root number	Maximum root length	Root number	Maximum root length	Root number	Maximum root length
2018										
RFC	315.00 ± 14.73ab	32.40 ± 2.41a	543.47 ± 15.88a	34.70 ± 2.80a	557.80 ± 16.87a	35.67 ± 2.18a	515.67 ± 14.37a	34.95 ± 1.08a	468.73 ± 12.89a	33.87 ± 0.92a
RC	308.00 ± 18.06ab	31.67 ± 2.72a	537.53 ± 16.60a	35.10 ± 1.58a	541.80 ± 17.84a	35.24 ± 1.40a	521.53 ± 17.20a	35.02 ± 1.01a	461.27 ± 10.80a	33.75 ± 1.43a
RF	278.47 ± 13.49b	30.66 ± 0.98a	425.67 ± 12.50b	31.65 ± 0.87a	429.53 ± 15.51b	33.45 ± 1.62a	379.27 ± 11.80b	32.86 ± 1.63a	323.87 ± 14.93b	31.86 ± 2.19a
CK	321.00 ± 29.17a	32.75 ± 2.65a	520.53 ± 21.83a	33.69 ± 3.57a	538.67 ± 28.41a	33.94 ± 0.84a	501.27 ± 8.20a	33.78 ± 1.33a	444.73 ± 12.78a	33.19 ± 0.90a
2019										
RFC	288.11 ± 5.23a	31.53 ± 0.21a	524.67 ± 13.28a	33.66 ± 1.26ab	537.89 ± 14.93a	35.72 ± 0.28a	501.55 ± 11.85a	32.93 ± 1.64a	432.22 ± 17.54a	29.81 ± 1.59a
RC	293.67 ± 3.76a	31.67 ± 0.15a	517.45 ± 20.72a	34.05 ± 1.63a	529.56 ± 12.17ab	34.66 ± 1.88a	510.67 ± 15.68a	32.68 ± 2.85ab	426.44 ± 8.37a	30.56 ± 1.64a
RF	250.11 ± 6.85b	31.51 ± 0.30a	388.78 ± 11.88b	30.13 ± 1.39b	384.78 ± 8.61c	30.73 ± 1.63b	323.11 ± 14.30b	29.21 ± 0.90b	261.89 ± 21.56b	25.80 ± 1.17b
CK	288.45 ± 1.07a	31.57 ± 0.25a	508.44 ± 16.98a	33.40 ± 1.91ab	520.56 ± 14.20b	33.87 ± 1.91ab	497.33 ± 4.37a	32.29 ± 1.29ab	419.44 ± 22.75a	30.04 ± 1.08a

2.4 垄作稻鱼鸡共生对水稻根系氧化活力的影响

由表 4 可知,2 a 中 4 个处理在齐穗期 - 齐穗 + 15 d 的水稻平均根系氧化活力均呈降低趋势。2 a 中 RFC 和 RC 处理较 CK 的水稻根系氧化活力在齐穗期 - 齐穗 + 15 d 均有所增加,增幅分别为 2.15% ~ 13.48% 和 0.64% ~ 10.05%,其中在 2018 年齐穗

期和齐穗 + 7 d 差异均达到显著水平($P < 0.05$); RF 处理水稻根系氧化活力均较 CK 显著降低($P < 0.05$),降幅为 10.49% ~ 21.68%;RFC 与 RC 处理间水稻根系氧化活力差异均不显著($P > 0.05$),但均显著高于 RF 处理($P < 0.05$)。

表 4 不同处理的水稻根系氧化活力

Tab. 4 Rice root antioxidant activity of different treatments

处理 Treatment	齐穗期 Full heading stage		齐穗 + 7 d 7 d after full heading stage		齐穗 + 15 d 15 d after full heading stage	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
	RFC	125.24 ± 5.53a	105.39 ± 6.21a	110.37 ± 4.71a	94.48 ± 0.82a	84.29 ± 3.51a
RC	122.69 ± 0.91a	106.27 ± 6.47a	108.64 ± 5.28a	93.47 ± 1.11a	82.07 ± 4.20a	67.47 ± 1.12a
RF	98.78 ± 2.67c	84.01 ± 3.33b	86.36 ± 2.44c	77.17 ± 2.53b	64.19 ± 3.55b	52.51 ± 2.76b
CK	110.36 ± 1.61b	103.48 ± 6.89a	99.24 ± 5.64b	90.05 ± 3.27a	78.65 ± 3.42a	67.04 ± 0.67a

2.5 垄作稻鱼鸡共生对水稻根系伤流液的影响

由表 5 可知,2 a 中 4 个处理在齐穗期 - 齐穗 + 15 d 的水稻平均根系伤流液均呈降低趋势,其中 RFC 处理由齐穗期的 37.64 g/株降至齐穗 + 15 d 的 28.84 g/株,RC 处理由 37.21 g/株降至 28.58 g/株,

RF 处理由 26.18 g/株降至 17.14 g/株,CK 处理由 35.83 g/株降至 27.39 g/株。2 a 中 RFC 和 RC 较 CK 处理在齐穗期 - 齐穗 + 15 d 水稻根系伤流液有所增加,除 2019 年齐穗期 RFC 和 CK 处理差异达到显著水平($P < 0.05$)外,其余时期均未达到显著水

表 5 不同处理的水稻根系伤流液

Tab. 5 Rice root bleeding sap of different treatments

处理 Treatment	齐穗期 Full heading stage		齐穗 + 7 d 7 d after full heading stage		齐穗 + 15 d 15 d after full heading stage	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
	RFC	38.95 ± 1.26a	36.33 ± 0.60a	34.47 ± 1.06a	31.93 ± 0.65a	31.62 ± 0.76a
RC	38.44 ± 0.88a	35.98 ± 0.63ab	33.94 ± 0.95a	31.58 ± 1.08a	30.98 ± 0.31a	26.18 ± 1.58a
RF	28.62 ± 1.39b	23.74 ± 0.87c	23.59 ± 1.85b	20.85 ± 1.19b	18.45 ± 0.69b	15.84 ± 1.05b
CK	37.85 ± 1.17a	33.82 ± 2.14b	34.67 ± 1.39a	29.99 ± 1.52a	30.37 ± 1.29a	24.42 ± 1.61a

平($P > 0.05$); RF 处理下水稻根系伤流液均较 CK 显著降低($P < 0.05$), 降幅为 24.39% ~ 39.25%; 2 a 中水稻根系伤流液在 RFC 和 RC 处理间差异不显著($P > 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 垄作稻鱼鸡共生对水稻根系形态结构的影响

水稻根系形态结构的形成除受自身品种影响外, 还受栽培措施(耕作方式、栽培密度等)、管理方式(水分调控、施肥水平等)和外界环境因素(光照、温度、氧气、土壤质地等)等多重因素的影响。水稻能否形成良好的根系形态结构决定着作物地上部干物质积累量、产量形成和品质改良。已有研究证实, 垄作栽培^[27]和稻鱼共生^[28]对水稻根系形态结构的形成均有一定的促进作用, 同时干湿交替灌溉的环境也使水稻根系干物质、深层根系(10 ~ 20 cm)的干物质、根冠比、根表面积和根数等显著增加^[29], 利于根系形态结构的形成。蔡昆争等^[30]研究表明, 表层根系的比重适当降低, 深层根系的比重适当增加有利于提高水稻产量。本试验研究发现, 与 CK 处理相比, 2 a 中水稻垄作养鱼(RF)处理在水稻根数、最长根长、根系体积、根冠比和根系干物质在分蘖期 - 成熟期均减小; 水稻垄作养鸡养鱼(RFC)和水稻垄作养鸡(RC)处理水稻根数、最长根长、根系体积和根系干物质在分蘖期 - 成熟期均有所增加(部分指标差异显著), 一方面可能是水稻与鸡在田间共作期间, 通过鸡不断排泄的粪便, 粪便中含有丰富的碳、氮等营养物质且结构简单, 易被微生物分解^[31], 对土壤结构和肥力起到调控、缓冲和促进作用, 且通过改善土壤孔隙, 增加土壤溶液滞留时间, 减少土壤养分的流失^[32], 土壤结构的改善和养分的增加, 有利于促进根系的生长; 另一方面是鸡在田间捕食、穿梭等活动, 有利于水稻群体通风透光和田间小气候环境的改善, 以及垄上保持湿润的土壤微环境利于水肥气热更好地发挥优势, 更有利于垄作稻鱼鸡共生模式下根系的生长及形态结构的形成。本研究还发现, 除 RC 处理于 2019 年分蘖期和孕穗期外, RFC、RC 和 CK 处理水稻根冠比均显著高于 RF 处理, 适当提高根冠比能够控制和协调地下部和地上部生长, 也是地上部和地下部协同生长的重要体现^[33]。

3.2 垄作稻鱼鸡共生对水稻根系氧化活力的影响

水稻生长后期根系氧化活力越强, 越有利于促进根系对营养物质的吸收和转运, 延缓叶片衰老, 提高光合效率, 利于植株地上部干物质的积累, 从而有

利于水稻籽粒灌浆与产量的形成^[34-35]。本试验研究发现, 2 a 中 RFC 较 CK 处理水稻根系氧化活力在齐穗期 - 齐穗期 + 15 d 均有所增加, 而 RF 较 CK 处理均显著降低。从 RFC 和 RC 处理的结果来看, 这与前人的研究较为一致, 而从 RF 处理来看, 又与前人的研究结果有所不同^[28]。分析其主要原因, 一方面是 RF 处理采用垄作栽培方法, 水稻移栽后, 垄沟水位保持在 15 cm 左右, 使得垄肩区域无法覆盖灌溉用水而保持半干旱半湿润的状态, 以及复合肥料采用基施, 进而导致杂草出土且快速生长^[36]; 水稻移栽 15 d 后, 投放的鸡苗和鱼苗后, 为保障鸡在田间的活动空间, 垄肩区域还是保持湿润无水状态, 致使鱼无法有效防控垄肩区域杂草的发生, 加上水稻生长前期植株无法形成有效的遮蔽作用, 利于杂草出土且快速生长, 致使水稻生长后期形成严重的草害, 并与水稻争夺光照、养分供应和生长空间, 成为限制水稻生长的关键因子之一^[37], 影响水稻后期根系的生长, 加速根系的衰老; 而 RFC 和 RC 处理通过鸡的活动, 对杂草形成有效防控, 加上鸡排泄的粪便和田间小气候的形成, 有利于水稻细根、嫩根的产生和生长, 使得水稻根系保持较高的活力。另一方面是以往的稻鱼共生模式多采用水稻平作栽培下开挖沟渠蓄水养鱼, 水稻移栽后田间保持水层, 以控制田间杂草的出土与生长, 待鱼无法取食水稻苗后, 加深田间水位, 将鱼放入稻田, 对杂草起到进一步防控作用, 杂草控制率可达 85% 以上, 进而控制杂草种类和数量, 使其无法形成草害^[38-39], 鱼活动于稻田, 对土壤起到疏松作用, 其排泄的粪便于于培肥土壤, 进而促进水稻根系的生长和根系氧化活力的提高^[28]。

3.3 垄作稻鱼鸡共生对水稻根伤流液的影响

根系伤流液的强度不仅能够衡量根系整体机能状况, 也是衡量根系生理活性的重要指标^[40], 并且根系伤流液中的蛋白质、可溶性糖、激素、氨基酸等物质, 对植株的生长及信号调控具有重要的作用^[41]。前人研究表明, 轻度干湿交替灌溉能够促进根系向深层土壤生长, 提高根系生理活性, 进而促进养分的吸收及同化, 增加根系合成有机物质^[42]。本研究发现, 与 RF 处理相比, RFC、RC 和 CK 处理的根系伤流液均显著增加, 其中 RFC 和 RC 处理增幅大于 CK。主要基于稻田由平作改成垄作后, 增加了土壤表面积和作物的生长空间^[27], 垄埂土壤为毛管水浸润, 出现气相, 利于水肥气热等环境因子的协同, 改善土壤团粒结构^[8]和根际环境的通气性^[43]; 同时垄肩区域保持干湿交替, 土壤处于还原、氧化交替变化过程, 有利于提高根系的碳氮代谢和养分的

吸收利用^[38], 促进强健根系形态的建成和地上部的生长。

水稻垄作栽培养鸡养鱼作为稻田综合种养的新型模式, 其中水稻垄作养鸡和水稻垄作养鸡养鱼处理植株根系形态构成指标略优于常规水稻垄作栽培(其中部分指标达显著水平), 且在水稻生长后期保持较高的生理活性, 利于减缓根系衰老进程, 为水稻地上部良好的生长发育和产量的形成奠定基础; 水稻垄作养鱼的根系形态构成和生理活性的各项指标均劣于常规水稻垄作栽培, 加快了水稻衰老进程, 需采取合理的调控措施防控田间杂草和虫害的发生, 进而保证水稻正常的生长发育。

参考文献:

- [1] Zhou Q, Ju C X, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C, Zhang J H. Grain yield and water use efficiency of super rice under soil water deficit and alternate wetting and drying irrigation [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 1028 - 1043. doi:10.1016/S2095-3119(16)61506-X.
- [2] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404 - 3414. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.17.008.
Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404 - 3414.
- [3] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 36 - 46. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2011.01.005.
Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 36 - 46.
- [4] 徐春梅. 水稻根际氧浓度对分蘖期根系形态和氮代谢的影响机制 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
Xu C M. Effect mechanism of rice rhizosphere oxygen concentration on root morphology and nitrogen metabolism at tillering stage [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016.
- [5] 梁玉刚, 张文斗, 谭长龙, 李静怡, 王丹, 黄璜. 稻田养鸭对直播水稻根系生长性状的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32(6): 154 - 160. doi:10.7668/hbxb.2017.06.023.
Liang Y G, Zhang W D, Tan C L, Li J Y, Wang D, Huang H. Effect of duck-raising in paddy fields on the crop root growth character [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(6): 154 - 160.
- [6] 李婷婷, 冯钰枫, 朱安, 黄健, 汪浩, 李思宇, 刘昆, 彭如梦, 张宏路, 刘立军. 主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响 [J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 293 - 302. doi:10.16819/j.1001-7216.2019.8116.
Li T T, Feng Y F, Zhu A, Huang J, Wang H, Li S Y, Liu K, Peng R M, Zhang H L, Liu L J. Effects of main water-saving irrigation methods on morphological and physiological traits of rice roots [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(4): 293 - 302.
- [7] 付景, 陈露, 黄钻华, 王志琴, 杨建昌. 超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系 [J]. 作物学报, 2012, 38(7): 1264 - 1276. doi:10.3724/SP.J.1006.2012.01264.
Fu J, Chen L, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J C. Relationship of leaf photosynthetic characteristics and root physiological traits with grain yield in super rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(7): 1264 - 1276.
- [8] 万琪慧, 马黎华, 蒋先军. 垄作免耕对水稻根系特性和氮磷钾养分累积的影响 [J]. 草业学报, 2019, 28(10): 44 - 52. doi:10.11686/cyxb2018743.
Wan Q H, Ma L H, Jiang X J. Root characteristics and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in rice plants cultivated under three different systems [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(10): 44 - 52.
- [9] 陈娟, 马忠明, 吕晓东, 刘婷婷. 水氮互作对固定道垄作栽培春小麦根系生长及产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1511 - 1520. doi:10.13287/j.1001-9332.201605.033.
Chen J, Ma Z M, Lü X D, Liu T T. Influence of different levels of irrigation and nitrogen application on the root growth and yield of spring wheat under permanent raised bed [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1511 - 1520.
- [10] 马忠明, 陈娟, 刘婷婷, 吕晓东. 水氮耦合对固定道垄作栽培春小麦根长密度和产量的影响 [J]. 作物学报, 2017, 43(11): 1705 - 1714. doi:10.3724/SP.J.1006.2017.01705.
Ma Z M, Chen J, Liu T T, Lü X D. Effects of water and nitrogen coupling on root length density and yield of spring wheat in permanent raised-bed cropping system [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(11): 1705 - 1714.
- [11] 章秀福, 王丹英, 屈衍艳, 李华. 垄畦栽培水稻的植株形态与生理特性研究 [J]. 作物学报, 2005, 31(6): 742 - 748. doi:10.3321/j.issn:0496-3490.2005.06.011.
Zhang X F, Wang D Y, Qu Y Y, Li H. Morphological and physiological characteristics of raised bed-cultivated rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(6): 742 - 748.
- [12] 冯军, 赵琳璐, 熊瑛, 王龙昌, 门胜男, 侯爽, 段美春. 保护性耕作对蚕豆根系生长及根际土壤有机碳动态的影响 [J]. 草地学报, 2018, 26(3): 602 - 610. doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2018.03.011.
Feng J, Zhao L L, Xiong Y, Wang L C, Men S N, Hou S, Duan M C. Dynamics of root development of broad bean and soil organic carbon in rhizosphere under conservation tillage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(3): 602 - 610.
- [13] 孙浩燕, 王森, 任涛, 丛日环, 李小坤. 不同施肥方式下氮肥用量对直播稻根系形态及氮素吸收的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 88 - 92. doi:10.11838/sfsc.20170613.
Sun H Y, Wang S, Ren T, Cong R H, Li X K. Effects of nitrogen fertilizer application on root morphological characteristics and nitrogen absorption of rice under different fertilization methods [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6): 88 - 92.
- [14] 赵锋, 王丹英, 徐春梅, 张卫建, 李凤博, 毛海军,

- 章秀福. 根际增氧模式的水稻形态、生理及产量响应特征[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 303-312. doi: 10.3724/SP. J. 1006. 2010. 00303.
- Zhao F, Wang D Y, Xu C M, Zhang W J, Li F B, Mao H J, Zhang X F. Response of morphological, physiological and yield characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) to different oxygen-increasing patterns in rhizosphere [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 303-312.
- [15] 陈健. 水稻栽培方式的演变与发展研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(5): 389-393. doi: 10.3969/j. issn. 1000-1700. 2003. 05. 019.
- Chen J. Evolution and development of rice planting pattern [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2003, 34(5): 389-393.
- [16] 马丽, 李潮海, 付景, 郭学良, 赵霞, 高超, 王磊. 垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7141-7150.
- Ma L, Li C H, Fu J, Guo X L, Zhao X, Gao C, Wang L. Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7141-7150.
- [17] Nyawade S O, Karanja N N, Gachene C K K, Schulte-Geldermann E, Parker M. Effect of potato hilling on soil temperature, soil moisture distribution and sediment yield on a sloping terrain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 24-36. doi: 10.1016/j. still. 2018. 06. 008.
- [18] Gu Y J, Han C L, Kong M, Shi X Y, Zdruli P, Li F M. Plastic film mulch promotes high alfalfa production with phosphorus-saving and low risk of soil nitrogen loss [J]. *Field Crops Research*, 2018, 229: 44-54. doi: 10.1016/j. fcr. 2018. 09. 011.
- [19] Chen Y Z, Chai S X, Tian H H, Chai Y W, Li Y W, Chang L, Cheng H B. Straw strips mulch on furrows improves water use efficiency and yield of potato in a rainfed semiarid area [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 142-151. doi: 10.1016/j. agwat. 2018. 09. 048.
- [20] 岳俊芹, 邵运辉, 汪庆昌, 秦峰, 方保停, 郑飞. 不同栽培方式对小麦生理特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 878-880.
- Yue J Q, Shao Y H, Wang Q C, Qin F, Fang B T, Zheng F. Effect of different planting patterns on the physiological characteristics and yield of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(5): 878-880.
- [21] 潘伟彬, 庄冬萍. 中国稻田养鱼的发展历史和主要模式[J]. 闽西职业大学学报, 1999(3): 69-70.
- Pan W B, Zhuang D P. The development history and main pattern of paddy-field-fish-culture in China [J]. *Journal of Minxi Vocational College*, 1999(3): 69-70.
- [22] Feng J F, Li F B, Zhou X Y, Xu C C, Fang F P. Nutrient removal ability and economical benefit of a rice-fish co-culture system in aquaculture pond [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 315-319. doi: 10.1016/j. ecoleng. 2016. 06. 002.
- [23] 谢坚, 刘领, 陈欣, 陈坚, 杨星星, 唐建军. 传统稻鱼系统病虫害草害控制[J]. 科技通报, 2009, 25(6): 801-805, 810. doi: 10.3969/j. issn. 1001-7119. 2009. 06. 020.
- Xie J, Liu L, Chen X, Chen J, Yang X X, Tang J J. Control of diseases, pests and weeds in traditional rice-fish ecosystem in Zhejiang, China [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2009, 25(6): 801-805, 810.
- [24] 张剑, 胡亮亮, 任伟征, 郭梁, 吴敏芳, 唐建军, 陈欣. 稻鱼系统中田鱼对资源的利用及对水稻生长的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 299-307. doi: 10.13287/j. 1001-9332. 201701. 040.
- Zhang J, Hu L L, Ren W Z, Guo L, Wu M F, Tang J J, Chen X. Effects of fish on field resource utilization and rice growth in rice-fish coculture [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 299-307.
- [25] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业与科技出版社, 2002.
- Zhao S J, Shi G A, Dong X C. Experimental instruction in plant physiology [M]. Beijing: China Agricultural Technology and Science Press, 2002.
- [26] 唐拴虎, 徐培智, 陈建生, 艾绍英, 张发宝, 黄旭. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 591-596. doi: 10.3321/j. issn: 1008-505X. 2007. 04. 009.
- Tang S H, Xu P Z, Chen J S, Ai S Y, Zhang F B, Huang X. Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(4): 591-596.
- [27] 郑华斌, 姚林, 刘建霞, 贺慧, 陈阳, 黄璜. 种植方式对水稻产量及根系性状的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 667-677. doi: 10.3724/SP. J. 1006. 2014. 00667.
- Zheng H B, Yao L, Liu J X, He H, Chen Y, Huang H. Effect of ridge & terraced cultivation on rice yield and root trait [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(4): 667-677.
- [28] 刘小燕, 刘大志, 陈艳芬, 黄璜, 钟蕾, 余建波. 稻-鸭-鱼共栖生态系统中水稻根系特性及经济效益[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(3): 314-316. doi: 10.3321/j. issn: 1007-1032. 2005. 03. 023.
- Liu X Y, Liu D Z, Chen Y F, Huang H, Zhong L, Yu J B. The character of rice roots in rice-duck-fish commensalisms ecosystem and its economic benefit [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2005, 31(3): 314-316.
- [29] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1026-1036. doi: 10.3724/SP. J. 1006. 2016. 01026.
- Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7): 1026-1036.
- [30] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的空分布及其与产量的关系[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 1-4. doi: 10.3969/j. issn. 1001-411x. 2003. 03. 001.
- Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between spatial distribution of rice root system and yield [J]. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2003, 24(3): 1-4.
- [31] 潘丹丹, 吴祥为, 田光明, 徐强, 保琦蓓, 周卉, 李霞. 土壤中可溶性氮和 pH 对有机肥和化肥的短期响应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 170-174. doi: 10.13870/j. cnki. stbxb. 2012. 02. 041.

- Pan D D, Wu X W, Tian G M, Xu Q, Bao Q B, Zhou H, Li X. Short-term response of organic and inorganic fertilizers on dissolved nitrogen and pH in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 170-174.
- [32] 周玲红, 张浪, 魏甲彬, 成小琳, 肖志祥, 徐华勤, 唐剑武, 唐启源. 冬闲稻田养鸡结合生物炭施用对双季稻田产量及土壤有机碳、活性碳氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1961-1969. doi: 10.11654/jaes.2017-1389.
- Zhou L H, Zhang L, Wei J B, Cheng X L, Xiao Z X, Xu H Q, Tang J W, Tang Q Y. Effects of winter chicken grazing with biochar application on crop yield, and soil organic carbon, active carbon, and nitrogen content in double-crop paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1961-1969.
- [33] 梁天锋, 陈雷, 唐茂艳, 王强, 张晓丽, 吕荣华. 不同水氮处理对水稻根系生长及其产量的影响[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(7): 1184-1189. doi:10.3969/j.issn.2095-1191.2015.7.1184.
- Liang T F, Chen L, Tang M Y, Wang Q, Zhang X L, Lü R H. Effects of different water and nitrogen treatments on root growth and yield for rice[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(7): 1184-1189.
- [34] 禹盛苗, 欧阳由男, 张秋英, 彭钢, 许德海, 金千瑜. 稻鸭共育复合生态系统对水稻生长与产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1252-1256. doi:10.13287/j.1001-9332.2005.0134.
- Yu S M, Ouyang Y N, Zhang Q Y, Peng G, Xu D H, Jin Q Y. Effects of rice-duck farming system on *Oryza sativa* growth and its yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1252-1256.
- [35] Kato Y, Okami M. Root growth dynamics and stomatal behavior of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions[J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(1): 9-17. doi:10.1016/j.fcr.2009.12.003.
- [36] Rao A N, Johnson D E, Sivaprasad B, Ladha J K, Mortimer A M. Weed management in direct-seeded rice[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 93: 153-155. doi:10.1016/S0065-2113(06)93004-1.
- [37] Farooq M, Siddique Kadambot H M, Rehman H, Aziz T, Lee D J, Wahid A. Rice direct seeding: experience, challenges and opportunities[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111(2): 87-98. doi:10.1016/j.still.2010.10.008.
- [38] 张丹, 闵庆文, 成升魁, 杨海龙, 何露, 焦雯珺, 刘珊. 不同稻作方式对稻田杂草群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1603-1608. doi:10.13287/j.1001-9332.2010.0219.
- Zhang D, Min Q W, Cheng S K, Yang H L, He L, Jiao W J, Liu S. Effects of different rice farming systems on paddy field weed community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1603-1608.
- [39] 王岳钧, 怀燕, 许剑锋. 稻田综合种养模式对水稻病虫害草害的控制作用及机理[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(6): 1016-1021. doi:10.3969/j.issn.1004-1524.2018.06.18.
- Wang Y J, Huai Y, Xu J F. Controlling effects and mechanisms on rice diseases, pests and weeds in rice-based coculture system[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(6): 1016-1021.
- [40] 陆大克, 段骅, 王维维, 刘明爽, 魏艳秋, 徐国伟. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1362-1372. doi:10.11674/zwyf.18352.
- Lu D K, Duan H, Wang W W, Liu M S, Wei Y Q, Xu G W. Comparison of rice root development and function among different degrees of dry-wet alternative irrigation coupled with nitrogen forms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8): 1362-1372.
- [41] Uga Y, Sugimoto K, Ogawa S, Rane J, Ishitani M, Hara N, Kitomi Y, Inukai Y, Ono K, Kanno N, Inoue H, Takehisa H, Motoyama R, Nagamura Y, Wu J Z, Matsumoto T, Takai T, Okuno K, Yano M. Control of root system architecture by deeper rooting 1 increases rice yield under drought conditions[J]. *Nature Genetics*, 2013, 45(9): 1097-1102. doi:10.1038/ng.2725.
- [42] 徐国伟, 陆大克, 刘聪杰, 王贺正, 陈明灿, 李友军. 干湿交替灌溉和施氮量对水稻内源激素及氮素利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 34(7): 137-146. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.018.
- Xu G W, Lu D K, Liu C J, Wang H Z, Chen M C, Li Y J. Effect of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on endogenous hormones, nitrogen utilization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 137-146.
- [43] 高明, 张磊, 魏朝富, 谢德体. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(4): 343-348. doi:10.11674/zwyf.2004.0402.
- Gao M, Zhang L, Wei C F, Xie D T. Study of the changes of the rice yield and soil fertility on the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2004, 10(4): 343-348.