

韦生宝, 陈宇婷, 刘云, 等. 稻鱼共作对不同留茬高度再生稻生长及产量的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 846-855.
WEI Shengbao, CHEN Yuting, LIU Yun, et al. Effects of rice-fish coculture on growth and yield of ratoon rice with different stubble heights[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(6): 846-855.

稻鱼共作对不同留茬高度再生稻生长及产量的影响

韦生宝¹, 陈宇婷¹, 刘云², 章家恩¹

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究华南双季稻区稻鱼共作对不同留茬高度再生稻生长及产量的影响, 为再生稻-鱼共作系统的水稻栽培及茬口管理提供科学依据。【方法】以‘野香优油丝’为供试再生稻品种, 通过设置稻作模式 (水稻单作和稻鱼共作) 与再生稻的头季稻留茬高度 (留茬高 10 和 30 cm) 双因素田间试验, 探究稻鱼共作对头季稻不同留茬高度的再生季水稻的生长特性及产量构成因素的影响。【结果】高留茬处理下稻鱼共作的再生季水稻产量显著高于水稻单作, 稻作模式和头季稻留茬高度对再生季水稻产量具有显著的交互作用影响。稻鱼共作条件下再生季水稻有效穗数和结实率较水稻单作分别显著提高了 18.2% 和 53.2%, 但穗粒数显著降低了 17.9%, 表明稻鱼共作通过提高再生季水稻群体有效穗数和结实率来弥补其穗粒数的不足, 从而提高再生季水稻的产量。头季稻收获的留茬高度显著影响再生季水稻齐穗期的叶片氮含量。头季稻成熟期根的玉米素核苷含量与成熟期叶片氮含量存在显著的正相关性, 表明提高头季稻成熟期叶片氮含量可能有利于增加其根部玉米素核苷含量, 从而间接促进再生季水稻腋芽的萌发。【结论】在本试验条件下, 华南双季稻区若发展再生稻单作生产, 头季稻收割时宜采取低留茬 (10 cm) 处理, 若采取再生稻-鱼共作生产, 头季稻收割时宜采取高留茬 (30 cm) 处理, 这样有利于促进后续再生季水稻的生长和产量提高。

关键词: 稻鱼共作; 再生稻; 留茬高度; 玉米素核苷; 产量; 生长特性

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)06-0846-10

Effects of rice-fish coculture on growth and yield of ratoon rice with different stubble heights

WEI Shengbao¹, CHEN Yuting¹, LIU Yun², ZHANG Jiaen¹

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of rice-fish coculture on growth and yield of ratoon rice with different stubble heights in the double rice cropping area of South China, and provide a scientific reference for rice cultivation and stubble management of the ratoon rice-fish coculture system. 【Method】Using ‘YeXiangYouYouSi’ as the ratoon rice variety for testing, a two-factor field experiment was conducted by setting rice cropping patterns (rice monoculture and rice-fish coculture) and stubble heights of the main season rice for ratoon rice (10 and 30 cm stubble heights), to explore the effects of rice-fish coculture on the growth

收稿日期: 2024-09-01 网络首发时间: 2024-10-22 09:30:19

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20241021.1036.002>

作者简介: 韦生宝, 博士研究生, 主要从事稻田生态研究, E-mail: 20221005007@stu.scau.edu.cn; 通信作者: 章家恩, 教授, 博士, 主要从事农业生态、土壤生态和生物入侵等研究, E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2021B0202030002); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目 (2022KJ105)

characteristics and yield components of ratooning season rice with different stubble heights in the main season. 【Result】 Under the treatment of high stubble, the rice yield of the ratooning season was significantly higher in the rice-fish coculture than that in the rice monoculture, and the rice yield was significantly affected by the interaction of the rice cropping pattern and stubble height of the main season rice. Compared with those in the rice monoculture, the effective number of spikes and seed setting rate of the ratooning season rice in the rice-fish coculture significantly increased by 18.2% and 53.2% respectively, while the number of grains per spike significantly decreased by 17.9%, which indicated that the rice-fish coculture compensated for the insufficient number of grains per spike by improving the effective number of spikes and seed setting rate of ratooning season rice population, thus enhancing the yields. In addition, stubble height significantly affected the leaf nitrogen content at the heading stage of the ratooning season rice. During the maturity stage of the main season rice, there was a significant positive correlation between the zeatin riboside content of roots and the nitrogen content of leaves, suggesting that increasing the nitrogen content of leaves at maturity might be beneficial to increase the zeatin riboside content of roots and thus indirectly promote axillary bud germination. 【Conclusion】 Under the conditions of this experiment, the low stubble (10 cm) treatment was more appropriate for the ratoon rice monoculture system, while the high stubble (30 cm) treatment was suitable for the ratoon rice-fish coculture in the double rice cropping area of South China, which might be favorable to the subsequent growth and yield improvement of the ratooning season rice .

Key words: Rice-fish coculture; Ratoon rice; Stubble height; Zeatin riboside; Yield; Growth characteristic

我国是世界上最大的水稻生产国与消费国，常年水稻种植面积约为 3 000 万 hm^2 ，产量达 2.1 亿 t，全国超六成人口以大米为主食，确保水稻生产的可持续性事关国家粮食安全^[1-2]。然而，近年来我国水稻生产成本逐年抬升，经济利润空间不断被压缩，农民开展水稻生产的积极性降低^[3-4]。因此，当前亟待探索和创新研究水稻绿色、健康、安全和轻简化生产技术模式，促进水稻丰产优质高效高质量发展。

稻鱼共作是指在水稻生长季节将水稻种植与鱼类养殖相结合在同一片稻田中的稻作模式^[5]。稻鱼共作具有促进物质循环^[6]、提高资源利用效率^[7]、增加水稻产量^[8]和促进农民增收^[9]等多重效应和效益，可以实现“一水两用、鱼稻双收”的生产效果，是一种生态循环、优质高效、绿色低碳的农业生产模式^[10]。截至 2023 年，我国稻鱼共作面积达 93.3 万 hm^2 ，是仅次于稻虾共作的第二大稻田种养模式^[11]。然而，目前稻渔综合种养模式以单季稻为主，在南方双季稻区开展稻鱼共作时，常面临着水稻和鱼类动物共生共作期短、茬口衔接紧张和劳动力成本增加等问题^[12-14]。华南地区是我国双季稻主要产区之一，国家统计局网站 (<https://data.stats.gov.cn>) 数据显示，华南地区常年稻谷播种面积为 385.6 万 hm^2 ，大部分稻田灌溉条件良好，但目前稻渔综合种养面积仅 6.53 万 hm^2 ^[11]，由此可见，稻渔综合种养在华南地区具有巨大的发展空间和潜力^[15]。

再生稻是指水稻头季收获后，通过一定的栽培措施使稻桩上的侧芽萌发成穗，从而达到再次收获目的的一种水稻种植模式^[16]，具有省种、省工、生产成本低、效益高等优点^[17]，被认为是提高水稻收获频次和经济效益的有效途径^[18]。目前，再生稻在我国 11 个省市的栽培面积已突破 120 万 hm^2 ^[19]。相关研究表明，再生稻的产量来源于水稻蓄留的稻桩上保留的休眠芽萌发产生的分蘖和基部新生的分蘖，一般认为前者为再生稻的产量提供了主要贡献^[20-21]。不同的留茬高度（头季稻收割后留下的稻桩高度）会对再生季水稻的产量产生差异，这与再生稻品种、生育期时长和生长环境有关^[22-23]。目前研究普遍认为低留茬能够延长再生季水稻的生育期，利于基部分蘖与地上部节位同时发育成穗，而生育期延长可以促进干物质的积累^[24]，留茬高度每降低 10 cm，生育期延长 7 d^[25]。

稻鱼共作往往需要增加田鱼在稻田中的共生时间，而单季稻生产中延长田鱼共生的时间长度较难突破，因此，通过种植再生稻开展稻鱼共作可以延长稻鱼共生期，从而提高鱼的产量。然而，稻鱼共作条件下，水稻通常处于 15~20 cm 的持续淹水环境中，长期淹水势必对再生季水稻基部节位休眠芽的发育产生影响，从而影响水稻腋芽萌发生长，进而对再生季水稻产量造成影响。目前，有关这些方面的影响效应尚不明确。基于此，本研究拟

开展再生稻-鱼共作下,在头季稻收获时设置不同留茬高度处理,研究其对再生季水稻的生长性状、再生特性和产量的影响,并阐明稻鱼共作对不同留茬高度条件下的再生季水稻的产量形成差异的原因,旨在为推进再生稻高效生态种养及其轻简化生产提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为‘野香优油丝’,由广西绿海种业有限公司提供,该水稻品种为感温粳型三系杂交稻,株型适中,分蘖力强,早稻全生育期 119.3 d。供试鱼苗品种为禾花鲤‘乳源 1 号’,采购自清远市绿之源渔业科技有限公司,该品种具有生长快、食性杂、抗病力强等特点。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 3 月至 11 月在华南农业大学增城教学科研基地 (23°14'N, 113°38'E) 进行。供试的稻田耕层 (0~20 cm) 土壤质地为沙质壤土,各组分含量分别为:土壤有机质 16.63 g/kg、全氮 0.92 g/kg、全磷 0.55 g/kg、全钾 13.73 g/kg、碱解氮 69.26 mg/kg、速效磷 40.12 mg/kg、速效钾 69.23 mg/kg, pH 为 5.31。

本研究实施稻作模式与头季稻不同留茬高度两因素田间试验。试验小区布置采取裂区设计方法,稻作模式处理为主区,头季稻留茬高度处理为裂区。设置 4 个田间处理,即稻鱼共作+头季稻留茬 10 cm(RF-10)、水稻单作+头季稻留茬 10 cm(RM-10)、稻鱼共作+头季稻留茬 30 cm(RF-30) 和水稻单作+头季稻留茬 30 cm(RM-30),每个处理 3 次重复。田间小区面积为 30 m²(5 m×6 m),小区之间田埂宽 50 cm,田埂高 30 cm。稻鱼共作处理田间小区单侧开挖一条宽 60 cm、深 40 cm 的“一”字型鱼沟,鱼沟上搭设拱形架,架子上铺设防鸟网,鱼沟与田面一侧底部留出通道,方便田鱼进出稻田。

头季稻于 3 月 4 日播种,4 月 4 日移栽,7 月 2 日收割,全生育期 120 d。头季稻采用人工收割,收割时刀口平切,留茬高度以刀口至水稻基部为准。再生季水稻于 9 月 20 日人工收割,全生育期 80 d。头季稻移栽株行距为 25 cm×18 cm,每穴 2~3 苗。水稻移栽 15 d 后投放鱼苗,投放密度为 1.5 万尾/hm²,鱼苗平均体质量为(30.00±0.35) g,稻鱼共作期间不进行饲喂。头季稻试验前施用有机肥 8 000 kg/hm² 作为基肥,有机肥中各组分质量分数为有机质 28.50%、氮 0.73%、磷 0.48%、钾 0.65%。

头季稻收割 2 d 后施用尿素 (50 kg/hm², 以施氮量计) 作提苗肥。田间所有小区在水稻前期采取浅水灌溉促苗返青,分蘖后期适当晒田控制无效分蘖,穗分化期间保持 10~15 cm 水层至头季稻收割前 5 d 排水晒田,然后收获头季稻。稻田养鱼小区田鱼不收获并赶入鱼沟。头季稻收获后所有小区田间土壤保持湿润状态,至再生季水稻分蘖长出 10 cm 后复水,此后田鱼可以进入田间自由取食活动。其他田间管理与当地水稻生产管理一致。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 叶片 SPAD 值 分别于头季稻抽穗期和成熟期、再生季水稻的分蘖期、抽穗期和成熟期采用便携式手持叶绿素仪 SPAD-502(Minolta, 日本) 测定植株最上部完全展开叶片的叶绿素相对值 (SPAD 值)。在每个小区内随机选取 5 穴水稻,每穴选择长势良好的 3 片叶子进行测定。测定时避开主叶脉区域,在叶片上、中、下 3 点分别测定,记录 3 点平均值作为该叶片的 SPAD 值。

1.3.2 氮含量与玉米素核苷含量 于头季稻和再生季稻的齐穗期和成熟期,按照植株平均茎蘖数在每个小区中选取 3 穴水稻,带回室内后清洗干净,按照茎鞘、叶和穗进行分样并装入信封,在烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,随后降温至 80 ℃ 烘干至恒定质量,记录每个部位的干物质质量。茎鞘和叶片分别采用磨样机粉碎备用。测定时样品过 0.246 mm 孔径网筛,采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,待测液中的氮含量采用靛酚蓝比色法测定^[26]。于头季稻齐穗期和成熟期每个小区选取 3 穴代表性植株,将倒 4 和倒 5 节位的腋芽和茎鞘剥离,保存腋芽样品用于测定玉米素核苷含量。于头季稻成熟期在每个小区中选择 3 穴具有代表性的植株,以水稻基部为中心挖取带植株的土块 (20 cm×20 cm×20 cm),装入网袋中及时转移到室内,用流水缓慢小心地冲洗,选取新鲜根系用于测定玉米素核苷含量。玉米素核苷含量的测定方法参考 Bollmark 等^[27] 使用的酶联免疫法。

1.3.3 再生率与产量 在头季稻齐穗期,于每小区中间 2 行数计 20 穴水稻茎蘖数;头季稻收割后第 10 天始,每 5 天记录再生苗数,直至再生季水稻齐穗。分别观测计量头季和再生季水稻的茎蘖数和有效穗数,然后按照以下公式计算第 35 天之前的再生率:再生率=再生季平均茎蘖数/头季稻有效穗数^[28],按照以下公式计算第 75 天的再生率,即最终再生率:最终再生率=再生季有效穗数/头季稻有效穗数^[29]。水稻产量测定分别于头季稻、再生季稻的

成熟期进行, 在每小区选取具有代表性的 3 个 1 m² 样方作为测产区域, 收割、脱粒处理, 并自然晾干, 利用风选机去除稻谷中的杂质和空瘪粒, 称重计为实测产量。数计 1 m² 样方的总穗数, 用于计算单穴有效穗数, 然后按照平均穗数每小区取样 3 穴, 用于考察每穗粒数、结实率和千粒质量等产量构成因素。

1.4 统计分析

试验数据利用 Excel 2019 进行整理, 利用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计学分析; 采用双因素方差分析研究稻作模式、留茬高度及两者间的交互作用对再生稻生长及产量的影响; 使用最小显著差异法 (LSD) 检验差异显著性; 使用 Pearson 法进

行相关性分析; 采用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 水稻株高与叶片 SPAD 值

表 1 表明, 头季稻不同留茬高度的再生季水稻株高在分蘖期存在显著差异, 这与头季稻留茬高度有关; 随着再生季水稻的生长, 所有处理的再生季水稻株高在抽穗期和成熟期均无显著差异。方差分析结果表明, 稻作模式对头季稻成熟期叶片 SPAD 值存在显著影响, 水稻单作处理叶片 SPAD 值高于稻鱼共作处理 (表 2)。头季稻留茬高度对再生季水稻抽穗期及成熟期叶片 SPAD 值存在极显著影响,

表 1 稻鱼共作对头季稻及不同留茬高度的再生季水稻株高 (h) 的影响¹⁾

Table 1 Effects of rice-fish coculture on plant heights (h) of main season rice and ratooning season rice with different stubble heights

稻作模式 Rice cropping pattern (RCP)	留茬高度/cm Stubble height (SH)	头季 Main season		再生季 Ratooning season		
		抽穗期	成熟期	分蘖期	抽穗期	成熟期
		Heading stage	Maturity stage	Tillering stage	Heading stage	Maturity stage
RM	10	112.6±1.7a	116.1±1.2a	68.3±1.3b	78.9±2.6a	87.2±2.1a
	30	113.1±1.3a	115.9±1.5a	83.6±0.4a	84.8±2.0a	87.8±0.9a
RF	10	113.3±0.8a	116.3±1.7a	66.0±2.3b	79.9±0.5a	87.9±1.6a
	30	114.9±0.1a	118.5±0.5a	84.7±1.6a	78.6±1.9a	89.9±0.7a
总方差 Total variance	RCP	1.08	1.22	0.16	1.53	0.69
	SH	0.80	0.55	133.68**	1.16	0.64
	RCP×SH	0.23	0.90	1.42	2.91	0.18

1) RM: 水稻单作, RF: 稻鱼共作; 株高数据为3次重复的平均值±标准误, 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著($P>0.05$, LSD法); **表示F值达极显著($P<0.01$)水平。

1) RM: Rice monoculture, RF: Rice-fish coculture; The data of plant heights are the means ± standard errors of three replicates, and the data in the same column followed by one same lowercase letter indicate that the difference is not significant ($P>0.05$, LSD method); ** indicates that the F -value reaches highly significant ($P<0.01$) level.

表 2 稻鱼共作对头季稻及不同留茬高度的再生季水稻叶片 SPAD 值的影响¹⁾

Table 2 Effects of rice-fish coculture on leaf SPAD values of main season rice and ratooning season rice with different stubble heights

稻作模式 Rice cropping pattern (RCP)	留茬高度/cm Stubble height (SH)	头季 Main season		再生季 Ratooning season		
		抽穗期	成熟期	分蘖期	抽穗期	成熟期
		Heading stage	Maturity stage	Tillering stage	Heading stage	Maturity stage
RM	10	31.0±0.4a	19.9±1.0a	43.7±0.8a	38.8±0.4c	16.0±0.5b
	30	31.6±0.5a	21.1±0.4a	43.3±0.9a	43.9±0.4a	16.5±0.6b
RF	10	33.1±0.7a	18.7±1.1a	43.3±0.9a	40.9±0.4b	26.2±1.2a
	30	31.6±1.0a	18.3±1.0a	41.9±1.6a	44.0±0.7a	18.9±0.9b
总方差 Total variance	RCP	2.12	6.07*	0.68	4.73	51.35**
	SH	0.37	0.24	0.68	63.21**	14.87**
	RCP×SH	1.87	0.97	0.20	4.18	19.54**

1) RM: 水稻单作, RF: 稻鱼共作; SPAD值数据为3次重复的平均值±标准误, 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著($P>0.05$, LSD法); *和**分别表示F值达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。

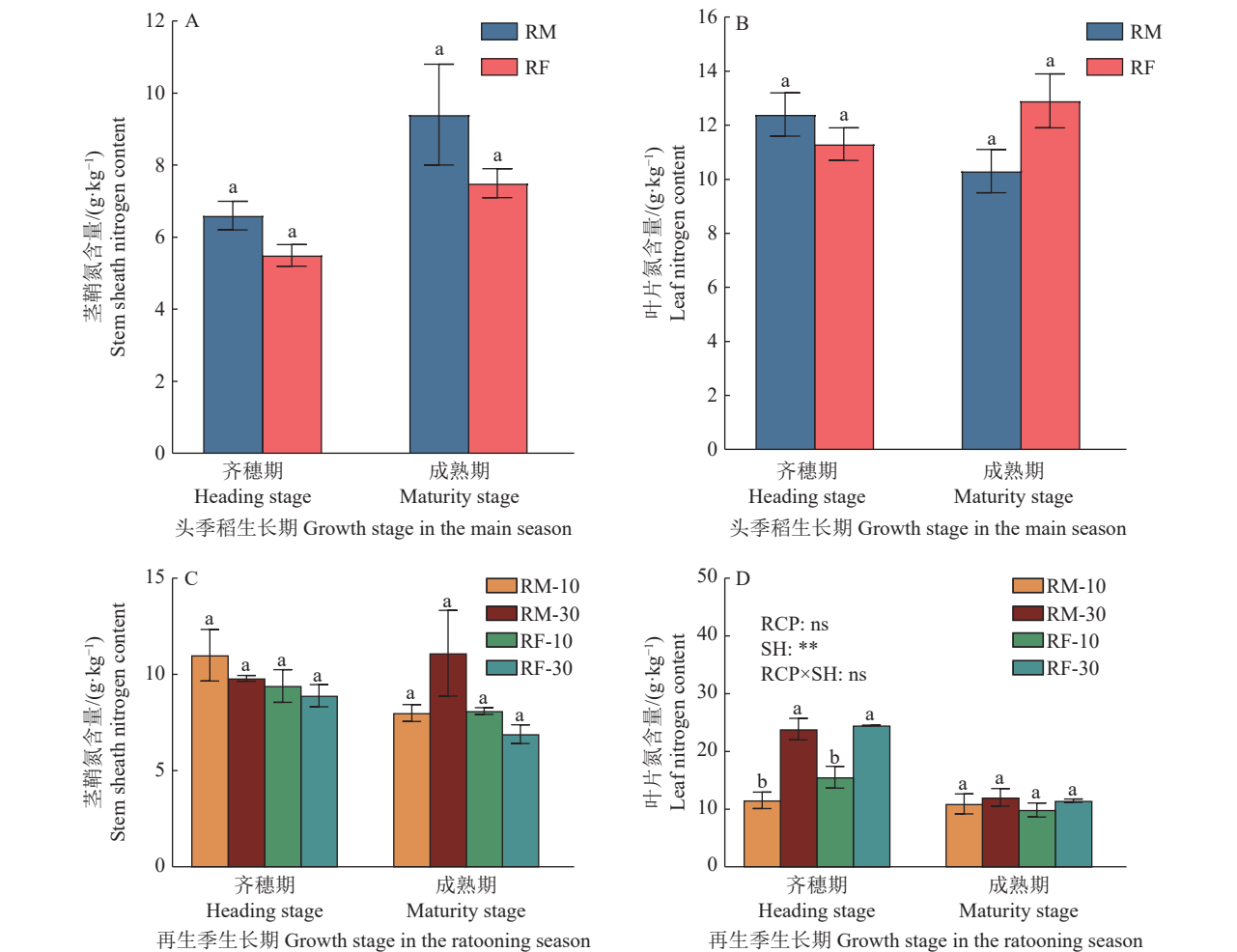
1) RM: Rice monoculture, RF: Rice-fish coculture; The data of SPAD values are the means ± standard errors of three replicates, and the data in the same column followed by one same lowercase letter indicate that the difference is not significant ($P>0.05$, LSD method); * and ** indicate that the F -values reach significant($P<0.05$) and highly significant ($P<0.01$) levels, respectively.

高留茬 (30 cm) 处理抽穗期的叶片 SPAD 值显著高于低留茬处理 (10 cm)。稻作模式极显著影响再生季成熟期水稻叶片 SPAD 值, 稻鱼共作处理叶片 SPAD 值显著高于水稻单作, 表明相较于水稻单作, 稻鱼共作延缓了再生季水稻成熟期叶片的衰老。稻作模式与留茬高度对再生季成熟期水稻叶片 SPAD 值的交互作用影响达极显著水平。

2.2 茎叶氮含量

与水稻单作相比, 稻鱼共作对头季稻齐穗期和成熟期茎鞘氮含量 (图 1A) 和叶片氮含量 (图 1B)

的影响均无显著差异。稻作模式与留茬高度及二者间的互作对再生季水稻齐穗期和成熟期茎鞘氮含量 (图 1C)、成熟期叶片氮含量均无显著影响, 但留茬高度对再生季水稻齐穗期叶片氮含量的影响达极显著水平 (图 1D), RM-30 处理叶片氮含量较 RM-10 显著提高 107.2%, RF-30 处理叶片氮含量较 RF-10 显著提高 57.7%, 但再生季成熟期水稻叶片氮含量在各处理间无显著差异, 表明 RM-30 和 RF-30 处理可能在籽粒灌浆过程中提高了叶片氮转运量及速率。



A 和 B 为头季, C 和 D 为再生季; RM: 水稻单作, RF: 稻鱼共作, RCP: 稻作模式, SH: 留茬高度; 图中头季稻茎鞘和叶片氮含量数据为 6 次重复的平均值±标准误, 其余数据为 3 次重复的平均值±标准误; 同一时期柱子上方凡是有有一个相同小写字母者, 表示差异不显著 ($P>0.05$, LSD 法); ns 表示不显著 ($P>0.05$), **表示 F 值达极显著 ($P<0.01$) 水平。

A and B are in the main season, C and D are in the ratooning season; RM: Rice monoculture, RF: Rice-fish coculture, RCP: Rice cropping pattern, SH: Stubble height; The data in the figure for stem and leaf nitrogen contents of the main season rice are the means ± standard errors of six replicates, and the rest are the means ± standard errors of three replicates; Where there is one same lowercase letter above bars in the same stage, it indicates that the difference is not significant ($P>0.05$, LSD method); ns indicates no significance($P>0.05$), and ** indicates that the F -value reaches highly significant ($P<0.01$) level.

图 1 不同处理下头季和再生季水稻齐穗期及成熟期茎叶的氮含量

Fig. 1 Nitrogen contents of rice stem sheath and leaves at heading and maturity stages of different treatments

2.3 玉米素核苷含量

与水稻单作相比较, 稻鱼共作对头季稻齐穗期腋芽以及成熟期的腋芽和根的玉米素核苷含量均无显著差异 (图 2)。

2.4 再生率

由图 3 可知, 再生季水稻在头季稻收获后 30~35 d 进入分蘖高峰期。方差分析结果表明, 稻作模式和头季稻留茬高度的交互作用对再生季水稻

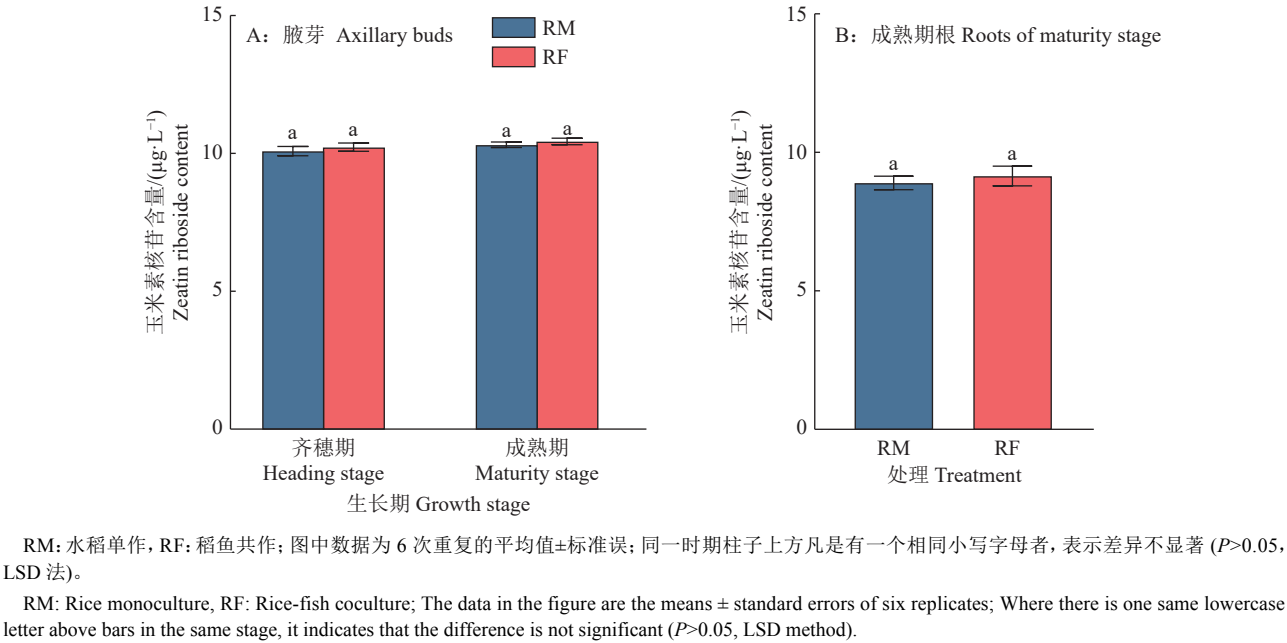


图 2 稻鱼共作对头季稻齐穗期和成熟期水稻腋芽及根部玉米素核苷含量的影响

Fig. 2 Effects of rice-fish coculture on zeatin riboside contents in axillary buds and roots of rice at heading and maturity stages of main season rice

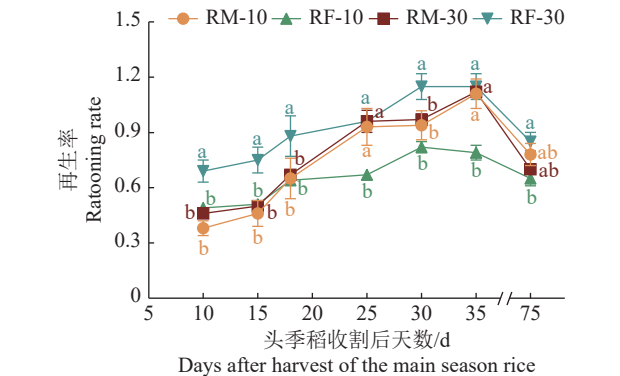


图 3 头季稻收割后再生季水稻茎蘖再生率的动态变化

Fig. 3 Dynamics of tiller ratooning rate of ratooning season rice after harvest of the main season rice

处理 Treatment	头季稻收割后不同时间的再生率 Ratooning rate at different days after harvest of the main season rice						
	10 d	15 d	18 d	25 d	30 d	35 d	75 d
	20.76**	9.5*	2.56	4.15	0.31	5.47	0.08
稻作模式(RCP) Rice cropping pattern							
留茬高度(SH) Stubble height	14.65**	8.68*	4.33	6.34*	12.71*	8.55*	1.68
RCP×SH	2.40	4.22	3.10	4.15	8.47*	7.94*	9.12*

1) 表格中第75天的再生率为最终再生率; *和**分别表示F值达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。

1) The ratooning rate at day 75 in the table is the final ratooning rate; * and ** indicate that the F -values reach significant ($P<0.05$) and highly significant ($P<0.01$) levels, respectively.

表 4 稻鱼共作对头季稻及不同留茬高度的再生季水稻产量的影响¹⁾

Table 4 Effects of rice-fish coculture on yield of main season rice and ratooning season rice with different stubble heights

稻作模式 Rice cropping pattern (RCP)	留茬高度/cm Stubble height (SH)	再生季 Ratooning season					
		头季 Main season					
		产量/ (kg·hm ⁻²) Yield	有效穗数/ (万穗·hm ⁻²) Effective spikes	穗粒数 Grains number per spike	结实率/% Seed setting rate	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield
RM	10	7 814.3a	274.3ab	98.4a	28.3b	16.8b	1 244.5ab
	30	7 814.3a	240.6b	58.0c	34.5b	18.2ab	955.5b
RF	10	7 961.3a	306.5a	75.4b	40.6b	17.8ab	1 229.0ab
	30	7 961.3a	302.0a	53.0c	55.6a	18.9a	1 550.0a
总方差 Total variance	RCP		10.326*	8.254*	19.256**	2.602	10.109*
	SH		1.716	41.574**	7.709*	5.492	0.031
	RCP×SH		1.007	3.381	1.337	0.075	11.220*

1) RM: 水稻单作, RF: 稻鱼共作; 表中头季水稻产量数据为6次重复的数据的平均值±标准误, 其余数据为3次重复的平均值±标准误; 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著($P>0.05$, LSD法); *和**分别表示 F 值达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。

1) RM: Rice monoculture, RF: Rice-fish coculture; The data of main season rice yield are the means ± standard errors of six replicaties, and the rest of the data are the means ± standard errors of three replicates; Data in the same column followed by one same lowercase letter indicates that the difference is not significant ($P>0.05$, LSD method); * and ** indicate that the F -values reach significant($P<0.05$) and highly significant ($P<0.01$) levels, respectively.

的交互作用对再生季水稻的产量具有显著影响。稻鱼共作处理下再生季水稻有效穗数较水稻单作处理提高了 18.2% ($P<0.05$), 其中 RF-10 处理的有效穗数较 RM-10 提高了 11.8%, RF-30 的有效穗数较 RM-30 显著提高了 25.5%。稻鱼共作再生季水稻穗粒数较水稻单作平均降低了 17.9% ($P<0.05$), 低留茬 (10 cm) 处理穗粒数较高留茬 (30 cm) 处理平均提高了 56.6% ($P<0.01$), 其中 RM-10 的穗粒数较 RM-30 显著提高了 69.7%, RF-10 的穗粒数较 RF-30 显著提高了 42.3%。稻鱼共作再生季水稻结实率较水稻单作平均提高了 53.2% ($P<0.01$), 低留茬处

理再生季水稻的结实率较高留茬处理平均提高 30.8% ($P<0.05$), 表明稻鱼共作通过提高再生季水稻群体有效穗数和籽粒的结实率弥补穗粒数不足, 从而提高再生季水稻产量。

2.6 头季稻玉米素核苷、植株氮含量及再生季水稻产量因子之间的相关性分析

进一步对头季稻成熟期腋芽和根的玉米素核苷含量与头季稻成熟期茎叶全氮含量、再生季水稻产量及产量构成因素进行 Pearson 相关性分析发现, 头季稻成熟期根的玉米素核苷含量与成熟期叶片氮含量存在显著的正相关性 (表 5), 这表明提高

表 5 头季稻成熟期腋芽和根部的玉米素核苷含量、头季稻植株氮含量与再生季产量构成因子之间的相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation analysis between zeatin riboside contents in axillary buds and roots at maturity stage of main season rice, plant nitrogen content of main season rice, and yield factors of ratooning season rice

指标 Index	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>
<i>a</i>	1.000									
<i>b</i>	-0.429	1.000								
<i>c</i>	0.362	-0.036	1.000							
<i>d</i>	0.221	0.621*	-0.084	1.000						
<i>e</i>	-0.207	0.289	-0.208	-0.292	1.000					
<i>f</i>	0.394	0.216	-0.104	0.452	0.209	1.000				
<i>g</i>	-0.077	0.145	-0.141	-0.354	0.028	-0.005	1.000			
<i>h</i>	-0.369	0.144	-0.092	0.100	-0.010	-0.347	-0.609*	1.000		
<i>i</i>	0.351	-0.006	-0.171	0.485	0.191	0.225	-0.690*	0.542	1.000	
<i>j</i>	0.497	-0.051	-0.178	0.553	0.416	0.642*	-0.177	-0.034	0.697*	1.000

1) *a*: 腋芽玉米素核苷含量, *b*: 根玉米素核苷含量, *c*: 茎鞘氮含量, *d*: 叶片氮含量, *e*: 最终再生率, *f*: 有效穗数, *g*: 穗粒数, *h*: 千粒质量, *i*: 结实率, *j*: 产量; *表示相关性达显著水平($P<0.05$, Pearson法)。

1) *a*: Zeatin riboside content of axillary bud, *b*: Root zeatin riboside content, *c*: Stem sheath nitrogen content, *d*: Leaf nitrogen content, *e*: Final ratooning rate, *f*: Effective spikes, *g*: Grain number per spike, *h*: 1 000-grain weight, *i*: Seed setting rate, *j*: Yield; * indicates correlation at significant level($P<0.05$, Pearson method).

头季稻成熟期叶片氮含量可能有利于增加其根部的玉米素核苷含量, 间接促进腋芽的萌发。本研究还发现, 再生季水稻穗粒数与千粒质量和结实率呈显著负相关, 产量与有效穗数和结实率呈显著正相关, 表明保障和提高再生季水稻的群体有效穗数是提高产量的有效途径。

3 讨论与结论

3.1 稻鱼共作对头季稻不同留茬高度的再生季水稻生长性状的影响

再生稻的产量增加在较大程度上归因于再生率的提高^[30]。本研究发现, 稻鱼共作对头季不同留茬高度条件下的再生季水稻再生率产生差异影响。30 cm 留茬处理下稻鱼共作对再生季水稻的最终再生率无显著影响, 但显著提高了再生稻的再生率。而 10 cm 留茬处理下稻鱼共作再生稻的最终再生率低于水稻单作。前人研究认为, 头季稻低留茬处理的水稻有效分蘖来源于低节位腋芽和基部萌发的分蘖, 低留茬处理的腋芽容易受到外界环境影响而降低再生能力^[31]。稻鱼共作对低留茬水稻的再生率产生影响的原因可能在于, 鱼类的活动和啃食行为可能会碰撞并损害低节位的腋芽以及基部刚刚萌发的分蘖, 而高节位的分蘖数和有效穗数则主要依赖于高节位腋芽的萌发, 因此不会受到稻鱼共作的明显影响。此外, 低留茬处理再生季水稻主要从头季稻留茬茎基部的第一和第二节位芽再生, 头季水稻生长期土壤水分过多、肥力供给不足或营养过剩均不利于稻茬腋芽萌发再生^[32]。研究发现, 稻鱼共作提高了头季水稻土壤全效养分含量^[33], 但头季水稻生长期过多的田间养分输入会导致腋芽加速萌发与伸长, 在头季稻采取低留茬收割时造成损伤, 从而减少了腋芽的萌发与分蘖的再生^[19]。细胞分裂素作为一种信号, 反应外源氮素的变化并参与调节植株代谢和发育^[34], 通常会随着氮素的供应通过根部转运到腋芽中。玉米素核苷是一种由根系产生的细胞分裂素, 可转运至水稻籽粒中并对灌浆充实起调控作用^[35]。前人研究发现, 根系中的玉米素核苷含量与根系活力密切相关, 而且通过栽培措施和化学调控提高根系活力可以增加玉米素核苷含量^[35], 但本研究中发现稻鱼共作与水稻单作的水稻根系的玉米素核苷含量无显著差异, 这或许与本研究水稻长期处于淹水环境有关, 即持续淹水会导致根系活力的降低^[36-37]。本研究结果表明, 头季稻成熟期根的玉米素核苷含量与叶片氮含量存在显著的正相关关系。同样地, 徐国伟等^[38]也发现根系合成的

玉米素核苷含量与叶片中氮代谢酶活性呈显著正相关。本研究还发现在不同稻作模式下的齐穗期, 留茬 30 cm 处理的再生季水稻叶片氮含量显著高于 10 cm 留茬处理, 这说明高留茬和低留茬处理会导致再生季水稻氮素利用率的显著差异, 其原因可能与高留茬处理的水稻能够利用较多来自头季稻的茎鞘贮藏的营养物质有关^[39], 低留茬处理的再生季水稻则主要依赖土壤养分的供给, 由此可见, 头季稻的留茬高度将会影响到再生季的施肥时期和施肥量的合理安排。

3.2 稻鱼共作对头季稻不同留茬高度的再生季水稻产量的影响

头季稻收割留茬高度是影响再生季水稻产量的关键因素。本研究发现, 稻作模式和头季稻留茬高度均会对再生季水稻的产量产生影响。随着头季稻留茬高度的降低, 再生季水稻穗粒数呈增加趋势, 这与前人研究结论^[40-43]基本一致。头季稻的高留茬处理可能通过促进头季根系活力的恢复与维持, 从而提高再生季水稻的再生力和产量^[44-45]。本研究还发现, 稻鱼共作可提升高留茬条件下再生季水稻的有效穗数和产量, 田鱼可能通过改善稻田养分状况为再生稻腋芽萌发与分蘖生长提供有效的养分供给^[46]。吴敏芳等^[47]研究认为, 在长期淹水的稻鱼共作系统中再生稻的留茬高度应该在 40 cm 左右, 这样可以保证头茬和再生茬水稻产量维持在一个较高的水平, 留茬高度为 20 cm 的再生季水稻由于其腋芽全部位于水面以下, 难以获得腋芽萌动生长所需要的充足氧气, 因而不利于其再生能力和最终产量的提升。本研究在前人研究的基础上, 对稻鱼共作条件下头季稻低留茬再生季水稻栽培模式的水分管理进行了适当改进, 即在头季稻收割后保持稻田土壤湿润, 待到低留茬的再生季水稻开始萌发, 再生出的分蘖高度达到 10 cm (不包括原茬口高度) 后复水, 能降低过早淹水对水稻低节位腋芽萌发的抑制, 通过这些措施的实施, 可在一定程度上提高再生季水稻的产量, 说明“头季稻低留茬+鱼共作”具有一定可行性。本研究还发现, 再生稻单作条件下头季稻低留茬处理的再生季水稻产量相对于高留茬处理更高, 这可能与低留茬处理下再生稻生育期更长以及干物质积累的增加有关^[24]; 而稻鱼共作条件下, 水稻高留茬处理的再生季水稻产量相对于低留茬处理更高。张桂莲等^[48]研究认为, 再生稻的再生芽主要集中在水稻的第 3、4、5 节上, 头季稻收割后留茬高度越高, 再生季水稻萌发的苗数越多^[49], 较高的苗数为产量形成奠定了基础, 本研

究观察到的实际效果与此结论基本一致。

3.3 再生稻—鱼共作的结构优化与功能强化问题

本研究发现, 尽管相比于水稻单作, 稻鱼共作有助于提高再生季水稻的有效穗数和结实率, 且在头季稻收获后的高留茬处理下, 稻鱼共作提高了再生季水稻的产量, 但本研究仅为 1 年的田间初步效果试验, 有关稻鱼共作 (不同管理模式、头季稻收获时不同留茬高度等) 对头季和再生季水稻的生长性状与产量因子的影响及作用机制尚缺乏系统深入研究, 因此, 今后需继续开展长期的田间定位观测试验, 以获取全面、系统、详实可靠的数据支持。具体而言, 可考虑以下几个方面的研究: 1) 再生稻—鱼共作系统的结构优化与管理措施优化研究。稻鱼共作对再生稻的生理生态作用效应会受到田鱼品种^[50]、鱼体大小^[51]和放养密度^[52]等的影响。同时, 田鱼和水稻等组分之间不同的结构参数配置 (品种、密度、大小、空间布局、时间安排等) 又会对水稻的田间管理 (水稻栽插密度、水分、肥料、留茬高度等) 有不同的要求, 最终影响到稻鱼共作系统的水稻和田鱼产量以及综合效益, 因此, 今后需进一步加强再生稻—鱼共作“农艺与生态”适配性与协同调控技术模式及生产技术规范或标准的研究。2) 头季稻鱼共作与再生季稻鱼共作的全程联动互动及整体功能强化研究。包括稻鱼共作条件下, 田鱼对头季水稻根系、根际微生态、土壤养分和土壤结构的影响, 继而对再生季水稻根系生长和腋芽萌发等再生力的影响, 头季水稻的生理生态特性及其水—肥—药—饲管理模式对再生季水稻的生长性状和产量品质形成的持续影响, 这些方面都需要开展深入和系统的研究。

3.4 结论

本研究探讨了再生稻的头季稻收获留茬高度在稻鱼共作和水稻单作模式下对再生季水稻生长和产量的影响。初步研究结果发现, 稻鱼共作提高了头季稻高留茬条件下再生季水稻的最终再生率, 而降低了低留茬条件下再生季水稻的最终再生率。头季稻高留茬处理下稻鱼共作提高了再生季水稻的产量, 而在水稻单作条件下低留茬处理的再生季水稻产量较高留茬处理显著增加。因此, 建议在华南双季稻区发展再生稻生产, 当采用水稻常规单作生产方式, 头季稻收割时宜采取低留茬处理, 而当采用稻鱼共作生产方式, 头季稻收割时宜采取高留茬处理, 这样将有利于促进后续再生季水稻的生长和产量形成。但适宜的头季稻收割留茬高度需要根据稻鱼共作系统中水稻和田鱼的品种特性、结构比

例和种养管理方式与技术措施等方面要求和优化匹配而定。

参考文献:

[1] CHEN W, XU Z, TANG L. 20 years' development of super rice in China: The 20th anniversary of the super rice in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 981-983.

[2] 张强, 张戈丽, 朱道林, 等. 1980—2018 年中国水稻生产变化的时空格局[J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 687-700.

[3] 陈风波, 汪峤, 喻雯, 等. 广东省农户水稻生产成本收益及种粮意愿分析[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(3): 144-153.

[4] 李俊杰, 李建平. 水稻生产成本效益国际比较及中国发展前景[J]. *中国稻米*, 2021, 27(4): 22-30.

[5] 陈欣, 唐建军, 胡亮亮. 生态型种养结合原理与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.

[6] CUI J, LIU H, WANG H, et al. Rice-animal co-culture systems benefit global sustainable intensification[J]. *Earth's Future*, 2023, 11(2): e2022EF002984.

[7] REN L P, LIU P P, XU F, et al. Rice-fish coculture system enhances paddy soil fertility, bacterial network stability and keystone taxa diversity[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 348.

[8] BERG H, LAN T, TAM N T, et al. An ecological economic comparison between integrated rice-fish farming and rice monocultures with low and high dikes in the Mekong Delta, Vietnam[J]. *Ambio*, 2023, 52(9): 1462-1474.

[9] YU H, ZHANG X, SHEN W, et al. A meta-analysis of ecological functions and economic benefits of co-culture models in paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 341: 108195.

[10] WAN N, LI S, LI T, et al. Ecological intensification of rice production through rice-fish co-culture[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 1002-1012.

[11] 全国水产技术推广总站中国水产学会. 中国稻渔综合种养产业发展报告 (2024) 全文发布[J]. *中国水产*, 2024(8): 12-17.

[12] 欧茜, 熊瑞, 周文涛, 等. 稻鱼共生养鱼密度对稻田甲烷排放的影响[J]. *农业环境科学学报*: 1-12.

[13] 徐峰, 刘德普, 彭俊明, 等. 南方双季稻栽植机械化发展的影响因素和关键技术措施[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(2): 1-7.

[14] 于秀娟, 郝向举, 党子乔, 等. 中国稻渔综合种养产业发展报告 (2022)[J]. *中国水产*, 2023(1): 39-46.

[15] 罗茵. 广东省农业科学院水稻研究所副所长钟旭华 广东应加快发展稻渔综合种养[J]. *海洋与渔业*, 2019(8): 27-28.

[16] 朱永川, 熊洪, 徐富贤, 等. 再生稻栽培技术的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(36): 1-8.

[17] PENG S, ZHENG C, YU X. Progress and challenges of rice ratooning technology in China[J]. *Crop and Environment*, 2023, 2(1): 5-11.

[18] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. *中国科*

- 学: 生命科学, 2014, 44(8): 845-850.
- [19] 林文雄, 翁佩莹, 林文芳, 等. 中国机收再生稻研究现状与展望[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 827-836.
- [20] 黄新杰, 屠乃美, 李艳芳, 等. 杂交稻不同节位再生稻的产量形成及其与头季稻的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(5): 470-475.
- [21] 黄振标, 胡香玉, 钟旭华, 等. 粤北地区不同留茬高度下适宜再生稻品种筛选及产量构成分析[J]. 广东农业科学, 2023, 50(12): 160-171.
- [22] 李阳, 杨晓龙, 汪本福, 等. 头季留茬高度对水稻再生季产量和稻米品质的影响[J]. 作物杂志, 2021(6): 164-170.
- [23] 余贵龙, 刘祥臣, 丰大清, 等. 不同留茬高度对豫南再生稻生育期及产量的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(5): 112-115.
- [24] YANG D, PENG S, ZHENG C, et al. Effects of nitrogen fertilization for bud initiation and tiller growth on yield and quality of rice ratoon crop in central China[J]. Field Crops Research, 2021, 272: 108286.
- [25] CHEN Y, ZHENG H, WANG W, et al. Early harvesting and increasing stubble-cutting height enhance ratoon rice yield[J]. Experimental Agriculture, 2023, 59: e20.
- [26] 邓穗生, 洪彩香. 靛酚蓝比色法测定植物全氮含量方法的改进[J]. 热带农业科学, 2013, 33(4): 5-7.
- [27] BOLLMARK M, KUBÁT B, ELIASSON L. Variation in endogenous cytokinin content during adventitious root formation in pea cuttings[J]. Journal of Plant Physiology, 1988, 132(3): 262-265.
- [28] 李亚贞, 郑伟, 肖小军, 等. 赣中北红壤稻田三熟制下机收留茬高度对再生稻产量的影响研究[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 87-92.
- [29] 唐浩, 陈立云, 杨益善, 等. 水稻的再生率及其与产量性状的关系[J]. 杂交水稻, 2003(3): 58-61.
- [30] ZHANG Q, LIU X, YU G, et al. Reasonable nitrogen regime in the main crop increased grain yields in both main and ratoon rice[J]. 2022, 12(4): 527.
- [31] YANG D, PENG S, ZHENG C, et al. Stubble height affects the grain yield of ratoon rice under rainfed conditions[J]. Agricultural Water Management, 2022, 272: 107815.
- [32] CHEN H, YAO F, YANG Y, et al. Progress and challenges of rice ratooning technology in Fujian Province, China[J]. Crop and Environment, 2023, 2(3): 121-125.
- [33] 隆斌庆, 陈灿, 黄璜, 等. “稻+鱼+再生稻”模式对稻田土壤氮、磷、钾养分含量的影响[J]. 作物研究, 2019, 33(5): 408-414.
- [34] 刘杨, 王强盛, 丁艳锋, 等. 氮素和 6-BA 对水稻分蘖芽发育的影响及其生理机制[J]. 作物学报, 2009, 35(10): 1893-1899.
- [35] 杨建昌, 彭少兵, 顾世梁, 等. 水稻结实期籽粒和根系中玉米素与玉米素核苷含量的变化及其与籽粒充实的关系[J]. 作物学报, 2001, 27(1): 35-42.
- [36] 廖健程, 胡德勇, 裴毅, 等. 控制灌溉条件下增氧对超级稻根系生长及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 920-924.
- [37] 秦华东, 江立庚, 肖巧珍, 等. 水分管理对免耕抛秧水稻根系生长及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 209-212.
- [38] 徐国伟, 陆大克, 刘聪杰, 等. 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, 2018, 34(7): 137-146.
- [39] 万定海. 不同母体营养条件下低节位再生稻生长和产量特性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [40] HARRELL D L, BOND J A, BLANCHE S. Evaluation of main-crop stubble height on ratoon rice growth and development[J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 396-403.
- [41] 易镇邪, 周文新, 屠乃美. 留茬高度对再生稻源库性状与物质运转的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(5): 509-516.
- [42] 谢磊, 许晖, 曹纯海, 等. 江汉平原再生稻机械化生产的产量构成因素分析和品种适应性研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(10): 2462-2465.
- [43] 胡润, 朱勤, 张玲霞, 等. 留茬高度对早籼类型再生稻生育期及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(13): 51-52.
- [44] 刘爱中, 邹冬生, 屠乃美, 等. 留茬高度对再生稻生长发育及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(17): 5120-5121.
- [45] 易镇邪, 屠乃美, 陈平平. 留茬高度对再生稻根系的影响[J]. 杂交水稻, 2005, 20(1): 59-62.
- [46] 郭海松, 罗衡, 李丰, 等. 不同水稻栽培密度下青田稻-鱼共生系统的土壤肥力[J]. 水产学报, 2020, 44(5): 805-815.
- [47] 吴敏芳, 张剑, 胡亮亮, 等. 稻鱼系统中再生稻生产关键技术[J]. 中国稻米, 2016, 22(6): 80-82.
- [48] 张桂莲, 屠乃美, 袁菊红, 等. 播种期对再生稻腋芽萌发和产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 32(3): 229-232.
- [49] 夏桂龙, 欧阳建平, 柳开楼, 等. 促芽肥用量和留茬方式对赣东北地区再生稻产量和再生能力的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(2): 27-30.
- [50] SAOWAKOON S, SAOWAKOON K, JUTAGATE A, et al. Growth and feeding behavior of fishes in organic rice-fish systems with various species combinations[J]. Aquaculture Reports, 2021, 20: 100663.
- [51] CAO QUOC N, VROMANT N, TRAN THANH B, et al. Investigation of the predation potential of different fish species on brown planthopper (*Nilaparvata lugens* (Stål)) in experimental rice-fish aquariums and tanks[J]. Crop Protection, 2012, 38: 95-102.
- [52] WANG Q, LI M, ZHANG J, et al. Suitable stocking density of fish in paddy field contributes positively to 2-acetyl-1-pyrroline synthesis in grain and improves rice quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(10): 5126-5137.