

稻鱼共作对水稻产量效应的Meta分析

蔡淑芳 黄献光 黄惠珍 包巍 张钟 雷锦桂

EFFECTS OF RICE-FISH CO-CULTURE ON RICE YIELD: A META-ANALYSIS

CAI Shu-Fang, HUANG Xian-Guang, HUANG Hui-Zhen, BAO Wei, ZHANG Zhong, LEI Jin-Gui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0288>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

哈尼梯田稻-渔共作模式下杂交黄颡鱼肠道微生物研究

MICROBIAL COMMUNITY STRUCTURE OF HYBRID YELLOW CATFISH IN RICE-FISH CO-CULTURE SYSTEM IN HANI TERRACE

水生生物学报. 2021, 45(6): 1232-1242 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.179>

稻虾共作水体浮游植物群落结构特征分析

CHARACTERISTICS OF COMMUNITY STRUCTURE OF PHYTOPLANKTON IN THE INTEGRATED RICE-CRAYFISH SYMBIOSIS FARMING SYSTEM

水生生物学报. 2019, 43(2): 415-422 <https://doi.org/10.7541/2019.051>

禾花鲤与建鲤肌间骨miRNAs测序与分析比较

MIRNAS SEQUENCING AND ANALYSIS OF INTERMUSCULAR BONE BETWEEN RICE FLOWER CARP AND JIAN CARP

水生生物学报. 2019, 43(4): 757-762 <https://doi.org/10.7541/2019.089>

基于线粒体D-loop区和Cyt b基因分析广西禾花鲤三个群体遗传结构

GENETIC STRUCTURE OF THREE POPULATIONS OF RICE FLOWER CARP (*CYPRINUS CARPIO*) IN GUANGXI ZHUANG AUTONOMOUS REGION BASED ON MITOCHONDRIAL D-LOOP REGION AND CYT B GENE

水生生物学报. 2021, 45(1): 54-59 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.041>

浅水湖泊人工繁育鳊放养规格对其成活、生长和产量的影响

EFFECTS OF RELEASE SIZE ON SURVIVAL, GROWTH AND YIELD OF HATCHERY-REARED MANDARIN FISH STOCKED IN A SHALLOW YANGTZE LAKE

水生生物学报. 2018, 42(6): 1163-1168 <https://doi.org/10.7541/2018.142>

不同形式蛋氨酸对黄鳝生长、血清生化、血清游离氨基酸含量及肌肉品质的影响

EFFECTS OF DIETARY METHIONINE ON GROWTH, SERUM BIOCHEMICAL INDEXES, SERUM FREE AMINO ACID AND MUSCLE TEXTURE OF RICE FIELD EEL (*MONOPTERUS ALBUS*)

水生生物学报. 2019, 43(6): 1155-1163 <https://doi.org/10.7541/2019.136>



doi: 10.7541/2023.2022.0288

稻鱼共作对水稻产量效应的Meta分析

蔡淑芳 黄献光 黄惠珍 包巍 张钟 雷锦桂

(福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350003)

摘要: 定量分析世界范围内稻鱼共作对水稻的产量效应, 为稻鱼共作技术的大面积推广应用提供科学依据。研究搜集了公开发表的102组稻鱼共作与水稻单作处理的水稻产量数据(截至2021年12月31日)。运用Meta分析方法, 明确了稻鱼共作对水稻产量的综合效应, 进而量化分析了时间区域、田间条件、水稻品种、肥药管理、鱼苗投放和投喂管理等对稻鱼共作产量效应的影响。与水稻单作相比, 稻鱼共作显著提高了水稻产量, 平均增产率约为17.2%(95%CI: 9.4%—25.6%), 分析结果可靠。不同区域气候稻鱼共作的产量效应差异显著, 国外和热带气候区域较高。2011年以后年份、田沟布局为一侧、水稻品种为粳稻的试验田中, 稻鱼共作的水稻增产率相对较高; 不同测产方式的产量效应差异不显著。不同肥药管理稻鱼共作的产量效应差异显著, 施肥3次、单一追肥、施用有机肥与无机肥、施药的产量效应较高; 在保障增产效应的前提下可以适当减少肥料农药的施用量, 采用有机肥和不施农药方式以获取经济与环境的双重效益。投苗时间、养殖模式、投苗密度、投喂与否稻鱼共作的产量效应差异显著, 在水稻移栽后21—25d投苗单养, 规格、密度及生物量控制在40 g/尾、1 尾/m²和30 g/m²以内, 不投喂饲料更能发挥稻鱼共作的增产效应。稻鱼共作能够显著提高水稻产量, 是有效利用稻田资源的可行方式。

关键词: 稻鱼共作; 水稻; 产量效应; Meta分析

中图分类号: S962.3⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2022)12-1924-08



生态循环农业是推进农业现代化、加快转变农业发展方式的突破口。近年来, 现代生态循环农业发展的稻渔综合种养模式蓬勃发展, 产业规模持续扩大, 新业态新模式不断涌现。2020年, 全国稻渔综合种养面积突破2.53×10⁶公顷; 其中稻鱼共作模式面积占比达39.02%, 是主要的综合种养模式之一。在稻田系统中开展稻鱼共作, 对高效利用资源、保障食物供给和降低环境影响具有重要意义^[1,2]。首先, 水稻种植和鱼类养殖的结合可提高有限耕地和淡水的利用效率。其次, 稻鱼共作可同时生产碳水化合物和动物性蛋白, 是提高人类营养水平和减轻贫困的动植物综合种养方式之一。再次, 稻鱼系统基于稻田生态系统内资源的循环利用, 可减少农药化肥的投入, 对水体和土壤环境影响较小。全球稻田面积1.63×10⁸hm², 主要分布在东亚及东南亚国

家和地区; 90%以上稻田为浅水环境, 为水生生物的天然繁殖和水产生物的人工养殖提供了优越的基础环境^[3]。然而, 目前全球稻田开展综合种养的比例仍较低。

稻鱼共作是否及如何影响水稻的产量一直是人们普遍关注的问题。已有较多研究就稻鱼共作对水稻产量的影响进行了定量分析, 这些研究成果对把握水稻产量在稻鱼共作情景下的变化趋势, 进而对农业生产决策和保障粮食安全具有重要作用。但是, 现有的定量研究结果之间存在一定差异, 且差异不仅表现在产量变化数值上, 也表现在产量变化方向上^[4,5]。Gurung等^[6]认为尽管稻鱼共作有3%—5%的水稻种植面积损失, 但与水稻单作相比, 共作水稻产量提高了9%; Tsuruta等^[7]认为由于鱼排泄物的施肥作用使共作水稻产量较单作提高了

收稿日期: 2022-07-12; **修订日期:** 2022-09-13

基金项目: 福建省科技特派员后补助项目(2022S2086); 福建省科协项目[闽科协学(2021)9号]; 福建省农业高质量发展超越协同创新“5511”工程(XTCXGC2021021)资助 [Supported by the Fujian Post Allowance Project of Science and Technology Commissioner (2022S2086); Project of Fujian Association for Science and Technology [FASTA(2021)No. 9]; Fujian “5511” Project of High-quality Agricultural Development (XTCXGC2021021)]

作者简介: 蔡淑芳(1985—), 硕士, 研究方向为设施农业与数字农业。E-mail: csf2019@qq.com

通信作者: 雷锦桂, 研究员; 研究方向为设施农业与数字农业。E-mail: 71906244@qq.com

20%。Xie等^[8]发现稻鱼系统中, 水稻单作与稻鱼共作处理间水稻产量无显著性差异, 但稻鱼共作中的杀虫剂和化肥施用量分别降低了68%和24%。梁玉刚等^[9]研究表明, 在垄作模式和15 cm垄沟水位条件下, 稻鱼处理水稻产量较水稻单作降低了29.98%; 车阳等^[10]则发现, 由于较少的肥料投入, 前者较后者显著降低了7.11%—7.54%。现有研究间的分歧为稻鱼共作的推广应用带来了诸多不确定性。分歧的原因是什么? 稻鱼共作的产量效应是否具有年代特征和区域性? 田间基础条件、水稻品种、肥药管理等是否会影响稻鱼共作的产量效应? 这些问题的答案无法在独立的田间试验研究中得到, 需要运用科学的分析方法对全球范围内的独立试验数据进行整合性分析。鉴于此, 本研究通过收集现有的相关田间试验数据, 运用Meta分析方法, 定量研究全球范围内稻鱼共作对水稻的产量效应, 并探讨时间区域、田间条件、水稻品种、肥药管理、鱼苗投放和投喂管理等因素对产量效应的影响程度, 为稻鱼共作模式的推广应用提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究基于中国知网、维普及Web of Science、Springer等中英文数据库, 以“水稻Rice”“鱼Fish”“生长Growth”“产量Yield”等及其组合为主题进行文献检索。所收集文献为2021年12月31日之前国内外公开发表的关于稻鱼共作对水稻产量影响的田间试验研究论文。并基于以下5个标准对所检索的文献进行筛选: (1)同一研究中必须包含稻鱼共作和水稻单作对照处理; (2)试验处理的重复数 ≥ 3 ; (3)文中列有相关处理产量的均值及标准差, 或提供了相关处理各重复的产量; (4)试验地点、田间条件、栽培管理、养殖管理、测产方式等基本信息清晰; (5)补充原文参考文献中引用但未被检索到的遗漏文献。

通过数据直接提取和WebPlotDigitizer软件提取方式, 提取论文中稻鱼共作与水稻单作的产量及标准差、处理重复数及其他相关信息, 共得到水稻产量数据102对用于Meta分析。汇总数据的时间跨度为1990—2021年, 地理跨度包含了中国、印度、日本、孟加拉国、印度尼西亚等国家。

1.2 效应值计算

本研究采用随机效应模型评估稻鱼共作对水稻的产量效应, 选取反应比(R)的自然对数(lnR)作为Meta分析的效应值^[11, 12], 来评价稻鱼共作对水稻产量的影响。具体的计算公式如下:

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (1)$$

式中, lnR为效应值, X_t 与 X_c 分别表示稻鱼共作与水稻单作处理下水稻的产量均值, 单位为kg/667 m²。

对数反应比的方差计算公式:

$$V_{\ln R} = \frac{S_t^2}{n_t X_t} + \frac{S_c^2}{n_c X_c} \quad (2)$$

式中, S_t 和 S_c 分别表示稻鱼共作与水稻单作处理的产量标准差; n_t 和 n_c 分别表示稻鱼共作与水稻单作处理的样本数量。

为了便于对结果的解释, 将计算结果转化为R(反应比), 再根据下面公式计算增产率Z:

$$Z = (R - 1) \times 100\% \quad (3)$$

依据转化数据结果进行分析和讨论。

1.3 数据分析

采用Stata软件进行相关数据分析, 使用Origin软件作图。

综合效应分析 一般地, 以综合效应值的95%置信区间是否包含0来判断变量的效应。为便于对结果的解释, 根据增产率与效应值之间的关系, 本文以综合增产率的95%置信区间是否包含0来说明稻鱼共作对水稻的产量效应。若其全部大于0, 说明稻鱼共作对水稻具有显著的正/增产效应; 若全部小于0, 则具有显著的负/减产效应; 若区间包含0, 则无显著的产量效应。

异质性检验 采用Q检验和I²检验进行异质性检验, 以考察稻鱼共作的产量效应是否受其他相关因素影响。若Q检验具有统计学意义($P < 0.05$)或 $I^2 > 50\%$, 则提示研究间存在异质性; 反之则不存在异质性。

发表偏倚检验 采用失安全系数Nfs和剪补法检验整个数据库的发表性偏倚。若 $Nfs < n + 10$ (n 为数据量)或剪补后产量效应变化明显, 则认为发表偏倚较大, 研究结果不能接受; 反之则发表偏倚较小, 结果可接受。

1.4 分亚组Meta分析

因不同农业生产区的气候条件、耕作措施差异较大, 且鱼苗投放、投喂管理等诸多因素对稻鱼共作水稻产量有一定影响。因此, 本研究对已有的数据以多种方式进行分组(表1), 考察不同亚组对稻鱼共作水稻产量效应的影响程度, 以寻找更加详细的异质性信息。

2 结果

2.1 稻鱼共作对水稻产量的综合效应值

研究结果表明(表2), 稻鱼共作的水稻增产率

达到17.2%, 置信区间为9.4%—25.6%, 显著高于水稻单作($P < 0.001$)。异质性检验 Q 值达到显著水平($P < 0.001$), I^2 值达50.76%, 表明各研究间存在一定的异质性, 需要引入解释变量。通过失安全系数(Nfs)计算可知, Nfs值为1243, 大于 $5n+10$; 且剪补前后稻鱼共作对水稻均具有显著的增产效应, 说明发表偏倚较小, 综合效应值结果可靠。

2.2 稻鱼共作对水稻产量效应的亚组分析

时间区域与田间条件对水稻产量效应分析 由表1可见, 试验区域、气候类型对水稻产量效应影响的差异显著($P < 0.05$), 试验年份、田沟布局的水稻产量效应差异不显著($P > 0.05$)。由图1可见, 不同试验年份、国内外区域的产量效应均为正效应,

2011年以后试验年份(12.9%, 3.8%—22.8%)和国外区域(29.4%, 15.7%—44.8%)的显著且较高, 2010年以前试验年份和国内区域的不显著且较低。2种气候类型的产量效应均为正效应且显著, 热带气候的较高(36.7%, 21.6%—53.6%)。4种田沟布局的产量效应均为正效应, 但仅有田沟布局为一侧(L1)的显著且最高(34.2%, 16.0%—55.2%), 其余3种田沟布局的不显著且较低。

水稻品种与肥药管理对水稻产量效应分析 由表1可见, 施肥管理(施肥次数、施肥方式、施肥品种)、施药与否对水稻产量效应影响的差异显著($P < 0.05$), 水稻品种的水稻产量效应差异不显著($P > 0.05$)。由图2可见, 2种水稻品种、施药与否的

表1 数据分组情况及Meta亚组分析结果

Tab. 1 Data grouping and results of sub-group meta-analysis

解释变量 Explaining variance	分类亚组 Classification of sup-group	异质性检验 Heterogeneity test	
		Q	P
时间区域与田间条件 Time, region and field conditions	试验年份Experiment year	1990—2010、2011—2021	0.01 0.930
	试验区域Experiment region	国内Domestic、国外Foreign	11.35 0.001*
	气候类型Climate type	亚热带Subtropical、热带Tropical	6.15 0.013*
	田沟布局Field ditch layout	一侧(L1)On one side、四周(L2)Around、内部(L3)Inside、四周与内部(L4)Around and inside	4.16 0.245
水稻品种与肥药管理Rice varieties, management of fertilizer and pesticide	水稻品种Rice varieties	籼稻Indica rice、粳稻Japonica rice	0.41 0.522
	施肥次数Fertilization times	1、2、3、4	9.53 0.023*
	施肥方式Fertilization pattern	单一基肥(BF)Base fertilizer、单一追肥(TF)Top fertilizer、基肥与追肥(BTF)Base and top fertilizer	9.02 0.011*
	施肥品种Fertilization varieties	单一有机肥(OF)Organic fertilizer、单一无机肥(IF)Inorganic fertilizer、有机肥与无机肥(OIF)Organic and inorganic fertilizer	23.62 0.000*
	施药与否Applying pesticide or not	未施药No-pesticide、施药Pesticide	9.20 0.002*
鱼苗投放与投喂管理Fry stocking and feeding management	投苗时间(移栽后天数)Fry stocking day after rice transplanting(d)	0—10、11—20、21—25	8.66 0.013*
	养殖模式Aquaculture model	单养Monoculture(MC)、混养Polyculture(PC)、立体养殖Vertical culture(VC)	6.63 0.036*
	投苗规格Size of fry (g/尾)	≤40、40—70	1.60 0.206
	投苗密度Density of fry (尾/m ²)	≤1、1—5.25	10.56 0.001*
	投苗生物量Biomass of fry (g/m ²)	≤30、30—65	3.52 0.060
	投喂与否Feeding or not	未投喂No-feeding、投喂Feeding	4.61 0.032*
其他Other	测产方式Yield estimation method	理论产量(TY)Theoretical yield、实际产量(AI)Actual yield	1.40 0.237

表2 稻鱼共作对水稻产量的综合效应值

Tab. 2 Comprehensive effect size of rice yield under rice-fish culture

模型 Model	增产率 Rate (%)	置信区间 CI (%)		效应量检验 Effect size test		异质性检验 Heterogeneity test			发表偏倚检验 Publication bias test			数据量 n	
		下限LL	上限UL	Z	P	Q	P	I^2 (%)	Nfs	剪补后After Trimfilling			
										增产率 Rate (%)	置信区间CI (%)		
随机效应模型REM	17.2	9.4	25.6	4.51	0.000	238.31	0.000	50.76	1243	30.2	22.1	38.8	102

Note: REM, CI, LL, UL represent Random effect model, confidence interval, lower limit and upper limit, respectively

产量效应均为正效应且显著, 但粳稻(22.4%, 1.1%—48.2%)和施药(56.4%, 28.0%—91.2%)的较高。除施肥3次以外, 其余3种施肥次数的产量效应均为正效应但不显著; 施肥3次的显著且产量效应最高(34.6%, 17.8%—53.9%)。3种施肥方式和施肥品种的产量效应均为正效应; 单一追肥(TF)、基肥加追肥(BTF)及施用有机肥与无机肥(OIF)、单一有机肥(OIF)的显著且较高, 单一基肥(BF)和单一无机肥(IF)的不显著且较低; TF(37.7%, 17.3%—61.5%)和OIF(42.2%, 18.3%—71.0%)的最高。

鱼苗投放与投喂管理对水稻产量效应分析 由表1可见, 投苗时间、养殖模式、投苗密度及投喂与否对水稻产量效应影响的差异显著($P<0.05$), 投苗规格及投苗生物量的水稻产量效应差异不显著($P>0.05$)。由图3可见, 3种投苗时间的产量效应均

为正效应, 投苗时间为水稻移栽后21—25d的显著且最高(38.2%, 16.4%—64.1%), 0—10d、11—20d的不显著且较低。单养(MC)的产量效应为正效应且显著并最高(20.70%, 10.00%—32.40%), 立体养殖(VC)的为正效应但不显著并较低, 混养(PC)的为负效应但不显著并最低。2种投苗规格和投苗生物量的水稻产量效应均为正效应, 规格为 ≤ 40 g/尾(20.9%, 8.0%—35.5%)、生物量为 ≤ 30 g/m²(26.8%, 12.9%—42.4%)的显著且较高, 40—70 g/尾、30—65 g/m²的不显著且较低。投苗密度为 ≤ 1 尾/m²的产量效应为正效应且显著并较高(23.1%, 12.9%—34.2%), 1—5.25 尾/m²的为负效应且不显著并较低。投喂与否的产量效应均为正效应且显著, 但未投喂饲料的较高(40.8%, 13.3%—74.9%)。

测产方式对水稻产量效应分析 由表1可

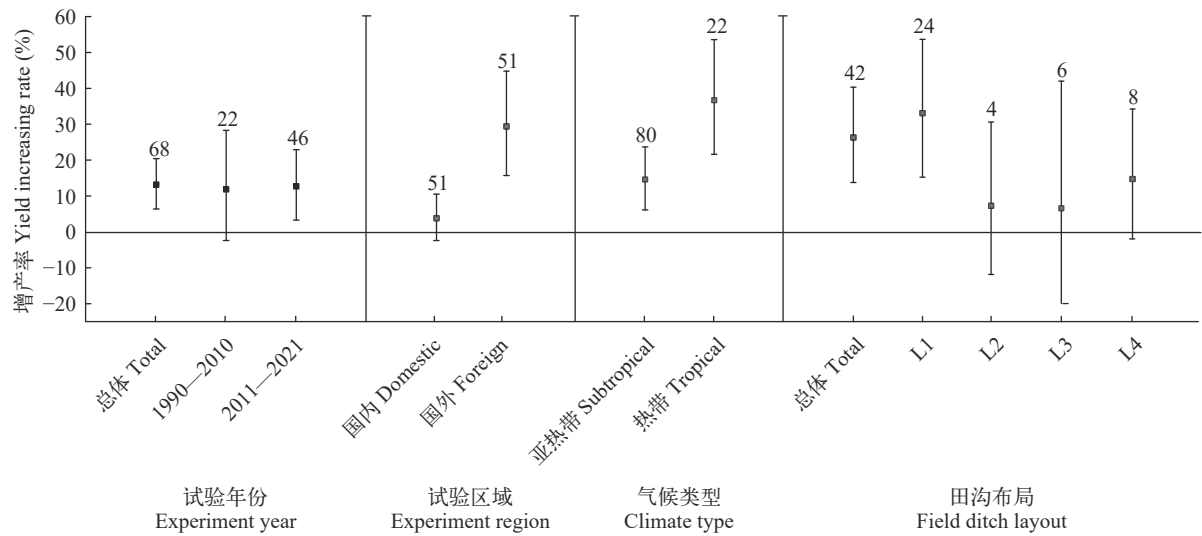


图1 时间区域与田间条件对水稻产量的效应分析

Fig. 1 Effect analysis of time, region and field conditions on rice yield

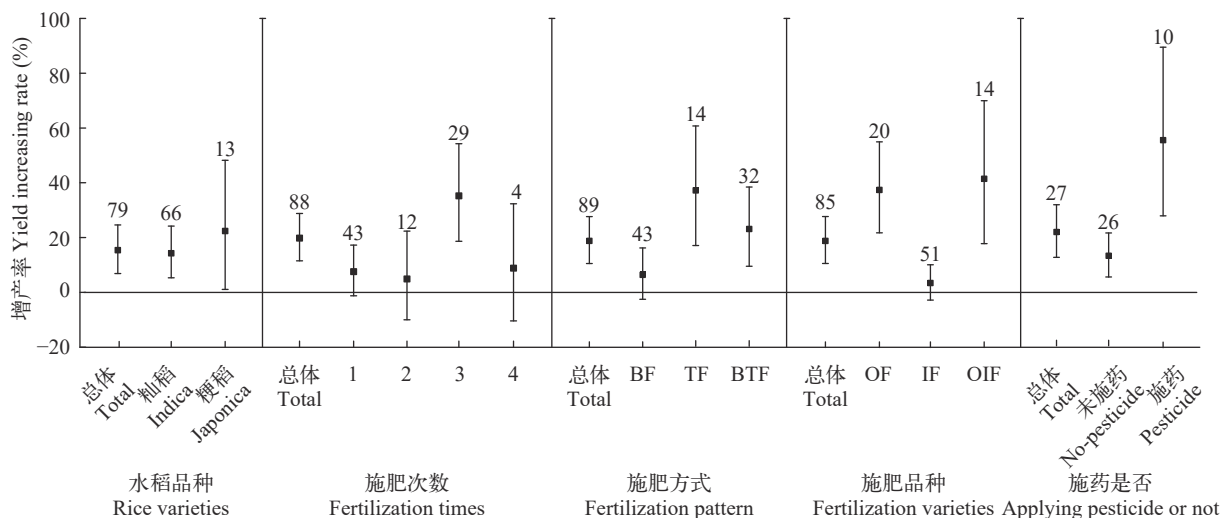


图2 水稻品种与肥药管理对水稻产量的效应分析

Fig. 2 Effect analysis of rice varieties, management of fertilizer and pesticide on rice yield

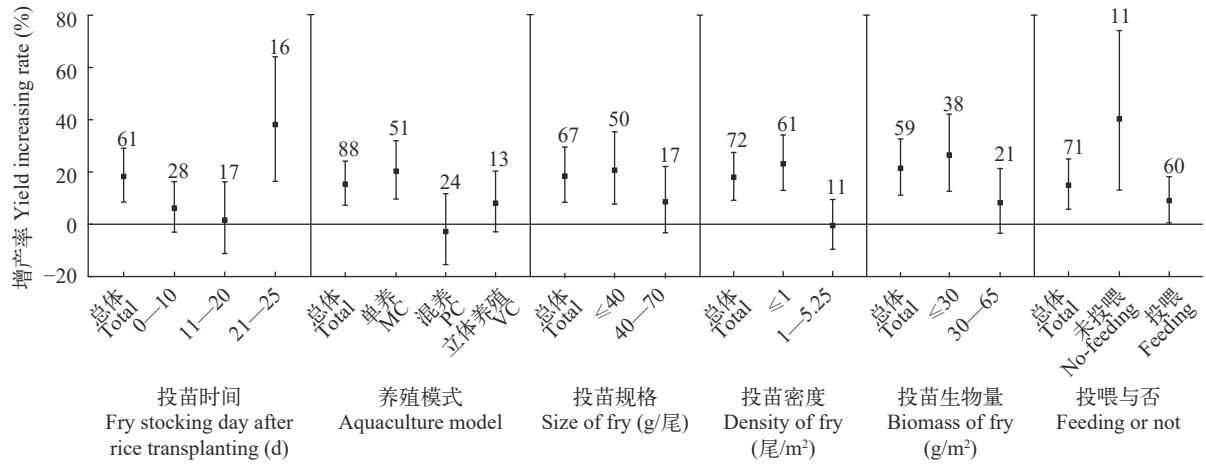


图3 鱼苗投放与投喂管理对水稻产量的效应分析

Fig. 3 Effect analysis of fry stocking and feeding management on rice yield

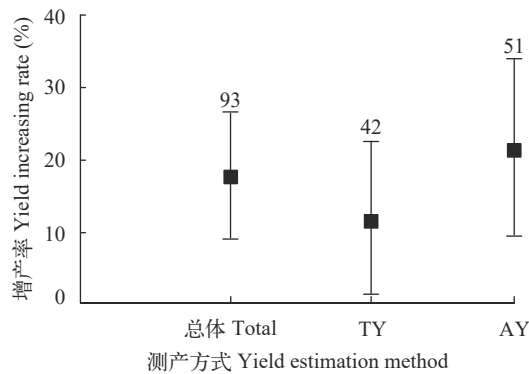


图4 测产方式对水稻产量的效应分析

Fig. 4 Effect analysis of yield estimation method on rice yield

见,测产方式对水稻产量效应影响的差异不显著($P>0.05$)。由图4可见,2种测产方式的产量效应均为正效应且显著,实际产量(AY)的产量效应较高(21.2%, 9.7%—34.0%)。

3 讨论

3.1 稻鱼共作的产量效应

本研究结果表明,稻鱼共作的水稻增产率达到17.2%(9.4%—25.6%),显著高于水稻单作。稻鱼共作增加了稻田有效养分,促进了水稻对养分的吸收,减少了稻田养分的损失等,促使水稻产量明显提高^[13, 14]。首先,鱼排泄物和未被利用的饲料提高了稻田水体和土壤有效养分,且其营养物质可被水稻作为肥料再次利用^[15];其所含的丰富有机质也有利于微生物增殖,进而促进养分循环和土壤原有养分的活化^[16]。其次,鱼在田间活动搅动土壤和水体,增加土壤孔隙度,减小土壤容重,促进土壤养分的释放^[17];且有利于水稻根系的生长发育,促进养分吸收。再次,稻鱼共作稻田长期处于淹水状态,稻田水层的存在既可减少水体养分流失^[18],亦可增加

土壤肥力,有助于水稻对养分的吸收。最后,鱼的摄食活动减轻了病菌、病虫对水稻的侵害,减少水稻的养分和产量损失;且鱼类取食杂草、水生生物及水藻等,减少了其对土壤和水体养分的吸收,使更多的养分流向水稻^[7],促进水稻生长。

3.2 影响稻鱼共作产量效应的因素

时间区域与田间条件 本研究结果表明,试验区域、气候类型的水稻产量效应差异显著,而且国外和热带气候区域具有较高且显著的增产效应。究其原因,水稻主要生产区域国内主要分布在亚热带气候区域,国外主要在热带气候区域。由于亚热带和热带气候区域的水热条件不同^[19],造成两者的产量效应差异。热带气候区域充沛的降水可促进稻田水体的交换,增加水体溶解氧含量^[20],有利于水稻和鱼的生长;且湿热的环境有助于土壤微生物的生长和繁殖,进而增强对有机质和矿物质的分解能力,释放的营养元素促进了水稻的生长^[21]。本研究结果同时表明,试验年份、田沟布局的水稻产量效应差异不显著;但2011年以后年份和田沟布局为一侧(L1)的具有较高且显著的增产效应。可能是因为随着时间推移,稻鱼共作研究和技术体系不断深入和优化^[3],使得水稻的产量效应逐渐表现为稳定的增产效应。另外,在稻田养殖鱼类时,大多需要为鱼类让出10%左右的沟坑空间。水稻边缘效应可弥补沟坑占用面积的损失^[22];且无论季节,鱼类在稻田分布均匀且数量大于沟坑中^[23];因此采用L1的较小沟坑比例布局,可促进鱼在稻田的分散分布从而强化稻鱼共生,且减少因面积损失造成的水稻减产,进而形成较好的增产效应。

水稻品种与肥药管理 本研究结果表明,肥药管理的水稻产量效应差异显著;其中,施肥3次、单一追肥(TF)、施用有机肥与无机肥(OIF)、施药

具有较高且显著的增产效应。这是因为水稻移栽前后具有不同的营养需求^[24], 阶段性施肥有利于水稻的稳产高产。因此施肥次数较多, 产量效应越明显; 而施肥4次的产量效应不显著可能是由数据量较少造成。有研究表明^[25], 重施基肥不利于提高水稻产量。本研究发现, TF的增产效应最高, 表明在稻鱼共作中, 追肥的作用更应引起重视。另外, 稻田施用有机肥与无机肥可有效平衡养分供应, 促进水稻稳产高产^[26]。且有机肥是稻鱼共作的首选^[27], 因其对鱼类毒害小, 分解缓慢、肥效长, 并通过肥水作用增加水中浮游生物的数量, 有利于鱼类的田间觅食, 进而促进水稻生长。因此单一施用有机肥(OF)亦具有较高且显著的增产效应。同时, 因鱼类觅食活动可控制水稻病虫害的发生, 稻鱼共作在许多情况下农药的使用量大大减少, 甚至无农药使用^[28]。本研究发现, 即使未施药, 稻鱼共作产量亦显著高于水稻单作。而在施药的情况下, 由于稻鱼系统对病虫害的控制更为严格, 水稻产量效应更为明显。考虑到施药可能造成农田生态系统稳定性和持续性降低, 推荐选取未施药策略开展稻鱼共作获得一定的水稻增产。此外, 不同水稻品种的产量效应差异不显著且均为显著的增产效应, 说明籼稻和粳稻均适合稻鱼共作栽培。

鱼苗投放与投喂管理 本研究结果表明, 投苗时间、养殖模式、投苗密度及投喂与否的水稻产量效应差异显著; 投苗时间为水稻移栽后21—25d、单养、密度 ≤ 1 尾/ m^2 、未投喂具有较高且显著的增产效应。这是因为水稻移栽后20d内投苗不利于稻鱼共同生长, 一方面水稻苗处于生长前期, 植株较弱, 容易被鱼取食; 另一方面水稻暂未封行, 沟坑中的鱼苗易被天敌捕食导致鱼的数量减少^[29]。在单养条件下, 由于稻田生态系统相对简单, 稻田水质污染较小, 生物病害发生率较低, 水质调控相对容易^[30], 有利于稻鱼共同生长。同时, 较高的投苗密度可能会造成生物个体竞争关系, 影响鱼类成活率, 不利于发挥鱼类对稻田的松土、增温、增氧作用, 致使水稻产量效应降低。另外, 在未投喂处理下, 鱼在饥饿胁迫下会更充分地利用田间自然资源^[31], 进入稻田觅食的活动频率和范围增强, 通过扰动土壤等使养分释放, 使营养物质更易接触水稻须根而被高效利用。未投喂处理下的稻鱼共作, 在满足较高的水稻产量外, 也避免了外源饵料投入可能造成的养分流失和面源污染风险^[32]。本研究结果同时表明, 投苗规格、投苗生物量的水稻产量效应差异不显著; 规格 ≤ 40 g/尾、投苗生物量 ≤ 30 g/ m^2 具有较高且显著的增产效应。规格70 g/尾以内的鱼苗

均为小规格苗种, 但规格 ≤ 40 g/尾与水稻具有更长的共生期, 两者共生效应更明显。有研究表明^[32], 在75—225 g/ m^2 的较高投苗生物量下, 稻鱼共作的水稻产量降低。本研究的投放生物量在65 g/ m^2 以内, 均为低生物量养殖, 但生物量 ≤ 30 g/ m^2 的更能减少因鱼类养殖生物量较高对水稻造成的减产效应。

测产方式 本研究结果表明, 理论产量与实际产量的水稻产量效应差异不显著且均为显著的增产效应, 说明测产方式对稻鱼共作的水稻产量效应无显著影响。

4 结论

稻鱼共作具有显著的增产效应, 增产率达到17.2%。不同区域气候稻鱼共作的产量效应差异显著, 国外和热带气候区域较高, 国内和亚热带气候区域较低。2011年以后年份、田沟布局为一侧、水稻品种为粳稻的试验田中, 稻鱼共作的水稻增产率相对较高; 不同测产方式的产量效应差异不显著。不同肥药管理稻鱼共作的产量效应差异显著, 施肥3次、单一追肥、施用有机肥与无机肥、施药的产量效应较高; 在保障增产效应的前提下可以适当减少肥料农药的施用量, 采用有机肥和不施农药方式以获取经济与环境的双重效益。投苗时间、养殖模式、投苗密度、投喂与否稻鱼共作的产量效应差异显著, 在水稻移栽后21—25d投苗单养, 规格、密度及生物量控制在40 g/尾、1尾/ m^2 和30 g/ m^2 以内, 不投喂饲料更能发挥稻鱼共作的增产效应。

本研究通过Meta分析方法定量分析了稻鱼共作的水稻产量效应, 分析结果在一定程度上证明了稻鱼共作具有显著的增产效应, 与前人的多数研究结果一致。但本研究也存在一定的局限性。由于Meta分析严格的文献筛选标准, 已有文献或数据描述不详实, 或无重复试验数据, 致使本研究纳入的文献数量较有限。且亚组分析每次只处理一个异质性因素, 由于样本量等原因, 本研究未同时对多因素进行探讨。另外, 稻鱼共作的增产效应受到本研究以外其他各种因素的影响, 例如水稻种植方式、密度、株行距和共生水位等, 由于数据量较少等原因而未在本研究讨论。尽管如此, 本研究所得结论与实际生产基本相符, 对稻鱼共作产业发展具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Khumairoh U, Lantinga E A, Handriyadi I, *et al.* Agro-ecological mechanisms for weed and pest suppression and nutrient recycling in high yielding complex rice systems

- [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021(313): 107385.
- [2] Zhu H Y, Qiang J, Xu G C, *et al.* Microbial community structure of hybrid yellow catfish in rice-fish co-culture system in Hani terrace [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(6): 1232-1242. [朱昊俊, 强俊, 徐钢春, 等. 哈尼梯田稻-渔共作模式下杂交黄颡鱼肠道微生物研究 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(6): 1232-1242.]
- [3] Hu L L, Tang J J, Zhang J, *et al.* Development of rice-fish system: today and tomorrow [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(3): 268-275. [胡亮亮, 唐建军, 张剑, 等. 稻-鱼系统的发展与未来思考 [J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(3): 268-275.]
- [4] Hu L L, Ren W Z, Tang J J, *et al.* The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013(177): 28-34.
- [5] Li L, Luo Q, Wu S L, *et al.* Review of integrated rice-fish farming and its comprehensive utilization in waterlogged land [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(5): 75-80. [李伦, 罗强, 吴士龙, 等. 渔稻养作及其在涝渍地综合利用中的研究综述 [J]. 节水灌溉, 2016(5): 75-80.]
- [6] Gurung T, Wagle S. Revisiting underlying ecological principles of rice-fish integrated farming for environmental, economical and social benefits [J]. *Our Nature*, 2005, **3**(1): 1-12.
- [7] Tsuruta T, Yamaguchi M, Abe S I, *et al.* Effect of fish in rice-fish culture on the rice yield [J]. *Fisheries Science*, 2011, **77**(1): 95-106.
- [8] Xie J, Hu L L, Tang J J, *et al.* Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(50): E1381-E1387.
- [9] Liang Y G, Li J Y, Wang D, *et al.* Impact of rice-fish-chicken ridge cultivation on rice population growth and yield [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, **22**(11): 165-175. [梁玉刚, 李静怡, 王丹, 等. 垄作稻鱼鸡共生对水稻群体生长特性及产量形成的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2020, **22**(11): 165-175.]
- [10] Che Y, Cheng S, Tian J Y, *et al.* Characteristics and differences of rice yield, quality, and economic benefits under different modes of comprehensive planting-breeding in paddy fields [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, **47**(10): 1953-1965. [车阳, 程爽, 田晋钰, 等. 不同稻田综合种养模式下水稻产量形成特点及其稻米品质和经济效益差异 [J]. 作物学报, 2021, **47**(10): 1953-1965.]
- [11] Wang X D, Zhuang J J, Liu B Y, *et al.* Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands: a meta-analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, **25**(8): 12-24. [王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 等. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的Meta分析 [J]. 中国农业大学学报, 2020, **25**(8): 12-24.]
- [12] Jiang L L, Liu J, Zhao T K, *et al.* Meta-analysis of combinative application of organic and inorganic fertilizers on effect of yield and qualities of tomato [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(4): 601-610. [姜玲玲, 刘静, 赵同科, 等. 有机无机配施对番茄产量和品质影响的Meta分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(4): 601-610.]
- [13] Huai Y, Wang Y J, Chen Y P, *et al.* Chemical fertilizer reduction analysis of rice-based co-culture system [J]. *China Rice*, 2018, **24**(5): 30-34. [怀燕, 王岳钧, 陈叶平, 等. 稻田综合种养模式的化肥减量效应分析 [J]. 中国稻米, 2018, **24**(5): 30-34.]
- [14] Zhou Y Q, Zou D S, Wang A D, *et al.* Effects of rice-fish integrated farming on soil nutrients and enzyme activities under long-term flooding [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022, **43**(5): 1-10. [周榆淇, 邹冬生, 王安崇, 等. 长期淹水条件下稻鱼复合种养对土壤养分和酶活性的影响 [J]. 农业现代化研究, 2022, **43**(5): 1-10.]
- [15] Vromant N, Chau N T, Ollevier F. The effect of rice seeding rate and fish stocking on the floodwater ecology of the rice field in direct-seeded, concurrent rice-fish systems [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **445**(1/2/3): 151-164.
- [16] Cao Z Q, Liang Z J, Zhao Y X, *et al.* Symbiotic effect of cultivating fish in rice field in North China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(3): 405-408. [曹志强, 梁知洁, 赵艺欣, 等. 北方稻田养鱼的共生效应研究 [J]. 应用生态学报, 2001, **12**(3): 405-408.]
- [17] Yang Y, Zhang H C, Hu X J, *et al.* Characteristics of growth and yield formation of rice in rice-fish farming system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, **37**(10): 1451-1457. [杨勇, 张洪程, 胡小军, 等. 稻渔共作水稻生育特点及产量形成研究 [J]. 中国农业科学, 2004, **37**(10): 1451-1457.]
- [18] Yuan W L, Cao C G, Li C F, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice-fish and rice-duck complex ecosystems and the evaluation of their economic significance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42**(6): 2052-2060. [袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统CH₄和N₂O温室效应及经济效益评估 [J]. 中国农业科学, 2009, **42**(6): 2052-2060.]
- [19] Li T, Hasegawa T, Yin X, *et al.* Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions [J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(3): 1328-1341.
- [20] Leigh C, Hiep L H, Stewart-Koster B, *et al.* Concurrent rice-shrimp-crab farming systems in the Mekong Delta: are conditions (sub) optimal for crop production and survival [J]? *Aquaculture Research*, 2017, **48**(10): 5251-5262.
- [21] Zhao M, Xue K, Wang F, *et al.* Microbial mediation of biogeochemical cycles revealed by simulation of global changes with soil transplant and cropping [J]. *The ISME Journal*, 2014, **8**(10): 2045-2055.
- [22] Wu X, Xie J, Chen X, *et al.* Edge effect of trench-pond pattern on rice grain and economic benefit in rice-fish co-culture [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(5): 995-999. [吴雪, 谢坚, 陈欣, 等. 稻鱼系统中不同沟型边际弥补效果及经济效益分析 [J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(5): 995-999.]
- [23] Halwart M, Borlinghaus M, Kaule G. Activity pattern of fish in rice fields [J]. *Aquaculture*, 1996, **145**(1/2/3/4): 159-170.

- [24] Long R P, Yang Z C, Mu J W, *et al.* Effects of postponing and decreasing nitrogen fertilizer on rice growth and nitrogen use efficiency under rice-fish coculture [J]. *Soils*, 2022, **54**(4): 708-714. [龙瑞平, 杨兆春, 穆家伟, 等. 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和氮肥利用效率的影响 [J]. 土壤, 2022, **54**(4): 708-714.]
- [25] Cheng C, Zeng Y J, Wang Q, *et al.* Effects of nitrogen application regime on Japonica rice yield and quality of the late rice in the double rice system in Southern China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(5): 1386-1395. [成臣, 曾勇军, 王祺, 等. 氮肥运筹对南方双季晚粳稻产量及品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(5): 1386-1395.]
- [26] Li W B. Impacts of co-culture of rice and aquatic animals on rice yield and quality [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. [李文博. 稻田综合种养对水稻产量和品质的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021: 19.]
- [27] Ni D S, Wang J G. Application value of rice-fish symbiosis ecosystem [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 1983, **10**(6): 1-4. [倪达书, 汪建国. 论稻鱼共生生态系统的应用价值 [J]. 水产科技情报, 1983, **10**(6): 1-4.]
- [28] Wan N F, Li S X, Li T, *et al.* Ecological intensification of rice production through rice-fish co-culture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(234): 1002-1012.
- [29] Ma W W, Chen C, Huang H, *et al.* Effect of rice-fish-chicken symbiosis on paddy soil nutrient and rice yield under ridge cultivation [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, **50**(8): 9-17. [马微微, 陈灿, 黄璜, 等. 垄作稻鱼鸡共生对稻田土壤养分含量及水稻产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2021, **50**(8): 9-17.]
- [30] Han F, Chang Z Q, Gao Y, *et al.* Analysis of the integrated multi-trophic aquaculture model [J]. *Journal of Aquaculture*, 2021(4): 24-30. [韩枫, 常志强, 高勇, 等. 多营养层次生态养殖模式简析 [J]. 水产养殖, 2021(4): 24-30.]
- [31] Zhang J, Hu L L, Ren W Z, *et al.* 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. [张剑, 胡亮亮, 任伟征, 等. 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.]
- [32] Ding W H, Li N N, Ren W Z, *et al.* Effects of improved traditional rice-fish system productivity on field water environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(3): 308-314. [丁伟华, 李娜娜, 任伟征, 等. 传统稻鱼系统生产力提升对稻田水体环境的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(3): 308-314.]

EFFECTS OF RICE-FISH COCULTURE ON RICE YIELD: A META-ANALYSIS

CAI Shu-Fang, HUANG Xian-Guang, HUANG Hui-Zhen, BAO Wei, ZHANG Zhong and LEI Jin-Gui

(Institute of Digital Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to provide a scientific basis for the large-scale application of rice-fish coculture technology, the study quantitatively analyzed the rice yield effects of rice-fish coculture in the world. 102 groups of rice yield data from published related literatures were sorted (up to December 31, 2021). Using the meta-analysis method, the comprehensive effect of rice-fish coculture on rice yield was clarified. The effects among different time, regions, field conditions, rice varieties, management methods of fertilizer, pesticide, fry stocking and feeding on rice yield were further quantified. Compared with rice monoculture, rice-fish coculture significantly increased rice yield, with an average increase rate of 17.2% (95% CI: 9.4%—25.6%). The analysis results were reliable. The results of subgroup analysis showed that there was significant difference in yield effect between different regions and climates, no significant difference between different yield estimation methods, and the yield effect was higher in foreign and tropical climate region. The yield increase rate of rice-fish coculture was relatively higher in the experimental fields where experiment was conducted after 2011, field ditch was arranged on one side (L1) and rice variety was Japonica. The yield effects of rice-fish coculture among different management methods of fertilizer and pesticide were significantly different, it was higher when fertilization times was three, fertilization pattern was single top fertilizer (TF), fertilization variety was organic and inorganic fertilizer (OIF) and pesticide was applied. On the premise of guaranteeing the yield increase effect, the application amount of fertilizer and pesticide could be appropriately reduced. Applying organic fertilizer (OF) and no pesticide could obtain dual benefits of economy and environment. The yield effects of rice-fish coculture were significantly different among fry stocking days, aquaculture models, fry densities and feeding strategies. When fish of single variety (MC) was stocked 21 to 25 days after rice transplanting without feed and the size, density and biomass were controlled within 40 g/tail, 1 tail/m² and 30 g/m², the rice-fish coculture had better yield increase effect. Rice-fish coculture can significantly increase rice yield, which is a feasible way to effectively utilize rice field resources.

Key words: Rice-fish coculture; Rice; Yield effect; Meta analysis