

钱江飞,袁 娇,焦文献,等. “稻鳅螺”共生对土壤酶及水稻光合效应、产量的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):83-89.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.011

“稻鳅螺”共生对土壤酶及水稻光合效应、产量的影响

钱江飞¹,袁 娇¹,焦文献¹,黄 璜^{1,2},陈 灿^{1,2}

(1. 湖南农业大学农学院,湖南长沙 410128; 2. 湖南省稻田生态种养工程技术研究中心,湖南长沙 410128)

摘要:为了解不同栽培方式与种养模式对土壤酶活性及水稻光合效应、产量的影响,通过田间试验,设置垄作养田螺(RC)、垄作养泥鳅(RL)、垄作养鳅螺(RCL)、常规垄作(CK)、平作养田螺(PC)、平作养泥鳅(PL)、平作养鳅螺(PCL)和常规平作(PCK)共计 8 个试验处理,研究平作及垄作不同栽培方式下稻鳅螺共生对土壤酶活性及水稻光合效应、产量的影响。结果表明,分蘖期以后,平作栽培方式下种养处理较垄作栽培模式可提高土壤有机质含量;种养模式均可提高土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶的活性。垄作栽培方式下,种养模式土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶的活性较 CK 分别提高 9.09%~16.50%、4.35%~24.35%、2.17%~19.57%;平作栽培模式下,种养模式处理土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶的活性较 CK 分别提高 13.53%~14.46%、5.93%~22.03%、17.02%~25.53%;垄作栽培各处理的叶面积指数最高值出现时间早于平作栽培,受种养模式影响较小;平作栽培方式在分蘖期的水稻 SPAD 值高于垄作栽培;水稻蒸腾速率和气孔导度表现为平作栽培整体略高于垄作栽培,PCL 和 RCL 处理的蒸腾速率及气孔导度均高于对应的 PCK 和 CK。垄作栽培各处理的净光合速率在灌浆期明显高于平作栽培,而在分蘖期和孕穗期,平作栽培处理略高于垄作栽培。PC 处理水稻产量最高,为 10.1 t/hm²,相比 PCK 增产 5.21%,垄作栽培方式种养处理的产量略低于平作栽培条件。综上所述,稻鳅螺共生模式较水稻单作均可提高土壤酶活性、水稻叶面积指数、叶片 SPAD 值、气孔导度、蒸腾速率、净光合速率。平作较垄作栽培方式更有利于产量的形成,稻鳅螺共生模式较水稻单作有稳产效应。

关键词:水稻;平作;垄作;稻鳅螺共生;土壤酶;光合效应;产量

中图分类号:S966.2;S966.4;S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0083-06

垄作栽培较平作栽培通过人为改变土壤形状,比平地增加 20%~30% 的地表面积,同时土壤的温度、湿度和透气性均有提高,使土壤不易板结,利于作物根系生长^[1-2];高凸的垄台与低凹的垄沟间的高度差便于雨季的排水防涝和干旱时期的灌溉储水,极大地提高了水分利用率,降低了土壤的氮(N)、磷(P)流失率,进而增加了土壤养分^[3-5];这样的地形不仅有利于集中施肥,节约肥料投入,提高肥料利用率,又高效利用了温光资源,提高了作物的光合能力^[6-7];作物与土壤、田间水、田间小气候等因素相互协调促进,结合温、光、热等自然条件,为作物稳产及增产提供良好的环境条件^[8]。脲

酶、蔗糖酶和过氧化氢酶是土壤酶中影响较大、研究较多的 3 种酶。土壤中的含氮有机物可被脲酶分解为氨,土壤氮素利用率及全氮含量与脲酶的活性密切相关^[9]。蔗糖酶的活性强度与土壤中的生物活性、土壤肥力呈正相关关系,一般而言,土壤中的蔗糖酶活性越高,土壤碳含量及土壤肥力越高^[10]。土壤微生物数量及呼吸强度与过氧化氢酶活性密切相关,过氧化氢酶的活性与土壤微生物数量和有机质含量呈正相关关系。提高作物光能利用率是提高作物产量的重要途径,限制提高作物产量因素的不是光能不足,而是农田光能利用率低^[11-12]。本试验探讨平作及垄作栽培下“稻鳅螺”共生对土壤酶活性及水稻光合效应、产量的影响,旨在为稻田复合种养结合合理的种植方式提供一定的理论借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年进行,试验地点位于湖南省长沙市长沙县路口镇明月村,试验土壤基础肥力:pH 值

收稿日期:2024-05-25

基金项目:湖南省农业农村厅项目(编号:2020-22);国家重点研发计划(编号:2018YFD0301003)。

作者简介:钱江飞(2000—),男,云南红河人,硕士研究生,主要从事稻田生态种养研究。E-mail:303392302@qq.com。

通信作者:陈 灿,博士,副教授,主要从事农业生态研究,E-mail:cc973@126.com;黄 璜,博士,教授,主要从事农业生态研究,E-mail:hh863@126.com。

5.65, 有机质含量 28.77 g/kg, 碱解氮含量 65.52 mg/kg, 速效磷含量 15.02 mg/kg, 速效钾含量 52.69 mg/kg, 全氮含量 1.16 g/kg, 全磷含量 0.27 g/kg, 全钾含量 5.35 g/kg。

1.2 供试材料

供试品种选用水稻农香 32、中国田螺、大鳞副泥鳅。

1.3 试验设计及田间管理

1.3.1 试验设计 本试验水稻栽培方式为起垄栽培及平作栽培 2 种栽培模式, 种养模式为稻螺、稻鳅螺、稻鳅及对照。垄作区域种养模式为垄作养田螺(RC)、垄作养泥鳅(RL)、垄作养鳅螺(RCL)和常规垄作(CK), 平作区域种养模式为平作养田螺(PC)、平作养泥鳅(PL)、平作养鳅螺(PCL)和常规平作(PCK), 共 8 个处理, 每个处理面积为 200 m²。处理间用田埂隔离, 不设重复, 采取多次取样方法。

1.3.2 田间设计及管理 田间设计: 垄作水稻起垄的垄宽 80 cm, 垄高 40 cm, 垄沟宽 40 cm, 垄沟深 50 cm。移栽水稻后筑埂封田, 田埂高 50 cm, 宽 40 cm, 田埂与垄不相连。田埂对角以聚氯乙烯管(PVC 管)设置进水口及出水口, 管道安装高度在田埂离沟底 30 cm 处, 管口两端用尼龙网包裹, 防止田螺和泥鳅出逃以及敌害生物进入。在养殖田螺和泥鳅的小区垄上立杆拉防鸟光带, 防止鸟禽对田螺和泥鳅造成减产。平作田埂高 50 cm, 宽 40 cm, 埂上覆膜以防处理间串水串肥; 每个小区在对角位置用管道安装进出水口, 管道安装高度在田埂离地 20 cm 处; 进出水口用尼龙网包裹, 以防田螺、泥鳅外逃及天敌进入。在养殖田螺和泥鳅的小区插杆拉防鸟光带, 在养殖田螺的平作小区中央以长宽 40 cm、深 50 cm 的规格挖设集螺坑。

整田与施肥: 6 月初整地, 后以纯氮 160 kg/hm²、P₂O₅ 96 kg/hm² 和 K₂O 120 kg/hm² 的用量施足基肥, 施肥后 2~3 d 起垄、筑田埂, 水稻整个生育期间不施用任何化学药剂。水稻栽培: 5 月 16 日播种育秧, 6 月 20 日移栽水稻, 水稻采用高密度移栽, 垄单侧种植 3 行水稻, 行距为 15 cm, 株距为 10 cm, 每穴 4~5 株苗, 每条垄种植 6 行水稻。平作区域水稻移栽株行距为 20 cm×25 cm, 每穴 4~5 株苗。

水产养殖: 7 月 10 日投放幼螺、鳅苗, 田螺、泥鳅投放规格为体重 10~12 g 的幼螺 10 万只/hm², 5 cm 左右的鳅苗 20 万尾/hm²。垄作田的水稻种植与养螺、养鳅不产生用水矛盾, 泥鳅和田螺投放前,

用 2%~3% 的食盐水进行浸泡消毒, 浸泡 3~5 min 后再投入田间, 投放时注意田间水温相差不超过 3 ℃, 试验期间, 田螺和泥鳅以浮萍、腐败杂草及枯枝败叶为食, 田螺繁殖季节, 视田螺生殖情况投放少量蛋黄补充母螺及仔螺的营养。各处理均采取相同的水肥管理, 以降低试验误差; 同时, 定期进行田间检查, 对破损田埂及时修复, 观察水位高低及螺鳅生长情况, 及时调节田间水位。9 月 15 日收割水稻, 水稻收割前 5~10 d 收获泥鳅和田螺。平作田的养螺处理需在夏季高温时期保持田间活水并加深水位至 15~20 cm, 以防高温致田螺死伤, 同时可在螺坑投放少许浮萍、轮叶黑藻用于田螺庇荫。9 月 20 日收割水稻, 水稻收割 5~7 d 前收获田螺、泥鳅并排水晒田。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤有机质含量及土壤酶活性 于水稻田翻耕前及各处理水稻生长的分蘖期、孕穗期、齐穗期、灌浆期、成熟期等时期对垄上不同高度土壤进行取样, 成熟期取垄作田养殖沟的沟底土样进行比对。于 0~20 cm 的表层土壤用五点采样法采集 1 个混合样, 各处理取 3 个混合样, 除杂避光自然风干, 碾磨过筛, 筛孔大小分别为 20、100 目, 密封避光保存。采用重铬酸钾-稀热法测定有机质含量。

五点取样法采集稻田翻耕前及各处理水稻成熟期后的稻田土壤, 分别混匀风干, 碾磨过筛, 密封保存。土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定, 以 24 h 后土壤中 NH₃⁻-N 含量表示; 土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 以 24 h 后土壤还原糖量来表示蔗糖酶的活性^[13]; 土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定, 以单位土重消耗的 0.1 mol/L KMnO₄ 的毫升数(对照与试验测定的差)表示土壤过氧化氢酶活性^[14]。

1.4.2 水稻光合效应 叶面积指数: 于水稻各个生育时期以每个处理的茎蘖平均数进行取样, 于实验室分离叶片, 用叶面积仪测量, 每个处理测量 3 匍水稻。

叶绿素相对含量(以 SPAD 值计): 于水稻主要生长发育时期, 选各处理小区不同高度位 10 株生长整齐一致的稻株, 于天气晴好的上午用日产 SPAD-502 型叶绿素仪, 选剑叶中部避开主脉处测定, 测量 3 个点, 叶绿素含量用 3 点均值表示。

光合生理指标: 水稻主要生育时期顶叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)采用美

产便携式光合系统分析仪 Li-6400XT 测定,每个处理测定 3 株生长一致的稻株,每叶叶片测量 3 次,取均值。

1.4.3 水稻产量 于水稻收割前,各处理选取 3 蔸水稻于室内考种,计算理论产量;各处理采用五点取样法收割 5 个 1 m² 左右的水稻,脱粒风选并自然风干,后测定样品重量和含水量,以此计算实际产量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 23.0 及 Origin 2024b 软件进行数据统计分析和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 平作及垄作稻螺鳅共生对土壤有机质含量及土壤酶活性的影响

由表 1 可知,各处理分蘖期有机质含量表现为

RC > RCL > CK > RL > PCK > PL > PC > PCL, 垄作各处理略高于平作各处理, PCK 高于平作种养处理。孕穗期有机质含量表现为 PCL > PL > PCK > RCL > RL > PC > CK > RC, 平作模式提高, 垄作模式整体低于平作模式, 各处理间差异均不显著 ($P > 0.05$)。齐穗期, 各处理有机质含量均有所增加, 种养模式均表现为稻鳅螺模式 > 稻鳅模式 > 稻螺模式 > 对照, 各种养模式的有机质含量平作栽培模式下均高于垄作栽培模式, 各处理间差异均不显著。灌浆期, PL 处理较 PCK 显著增加 10.07%, 其他处理与 PCK 无显著差异; 各垄作栽培处理表现为 RL > RCL > RC > CK, 处理间无显著差异。种养模式在成熟期表现为稻鳅螺模式 > 稻螺模式 > 稻鳅模式 > 对照, 沟底土样表现为 RC > RCL > RL > CK, RC、RCL 处理显著高于 CK。总体来看, 平作栽培下种养处理均有提高, 稻鳅螺模式优于稻螺模式、稻鳅模式。

表 1 平作及垄作稻螺鳅共生对土壤有机质含量的影响

处理	土壤有机质含量(g/kg)					
	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	成熟期	成熟期沟底土样
PL	25.674 ± 0.748ab	29.159 ± 0.853a	32.342 ± 0.901a	33.230 ± 0.246a	28.297 ± 0.819a	
PCL	20.093 ± 1.010c	29.510 ± 0.782a	32.647 ± 0.971a	32.132 ± 0.135ab	30.756 ± 0.718a	
PC	23.565 ± 0.228bc	27.388 ± 0.321a	31.164 ± 0.413a	32.131 ± 0.304ab	29.779 ± 0.329a	
PCK	26.805 ± 0.433ab	29.081 ± 0.995a	29.977 ± 0.460a	30.191 ± 0.215b	21.143 ± 0.659a	
RC	28.816 ± 0.706a	24.050 ± 0.527a	30.105 ± 0.469a	30.784 ± 1.090ab	25.626 ± 0.919a	32.619 ± 0.806a
RCL	28.658 ± 0.468a	27.556 ± 0.386a	30.401 ± 0.054a	31.001 ± 0.753ab	26.936 ± 0.430a	28.368 ± 0.236ab
RL	28.277 ± 0.725a	27.469 ± 0.682a	30.256 ± 0.939a	31.375 ± 0.351ab	23.634 ± 0.263a	23.788 ± 0.318bc
CK	28.441 ± 0.222a	27.211 ± 0.961a	29.315 ± 0.670a	29.471 ± 0.361b	18.727 ± 0.973a	20.532 ± 0.484c

注:同列数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

由表 2 可知, 垄作栽培处理的蔗糖酶活性表现为 RC > RL > RCL > CK > 垄本底, 种养处理较 CK 差异不显著, RC、RL、RCL 较 CK 分别增加 16.50%、14.82%、9.09%; 平作栽培模式表现为 PC > PL = PCL > PCK, 种养处理较 PCK 差异不显著, PC、PCL、PL 处理较 PCK 分别增加 14.46%、13.53%、13.53%。垄作栽培模式下, RC、RL 处理的土壤脲酶活性略高于 CK, 增幅分别为 8.70%、4.35%, RCL 处理较 CK 显著提高 24.35%; 平作栽培模式下, PCL 处理显著高于 PCK, PC、PL 处理略高于 PCK, PC、PCL、PL 较 PCK 分别增加 13.56%、22.03%、5.93%。垄作栽培模式下, RC、RCL 处理的土壤过氧化氢酶活性显著高于 CK, RL 处理略高于 CK, RC、RCL、RL 处理较 CK 分别提高 17.39%、19.57%、2.17%; 平作栽培模式下, 种养模式均显著

高于 PCK, PC、PCL、PL 处理较 PCK 分别提高 17.02%、25.53%、23.40%。

表 2 平作及垄作稻螺鳅共生对土壤酶活性的影响

处理	土壤蔗糖酶活性 [mg/(g·24 h)]	土壤脲酶活性 [mg/(g·24 h)]	土壤过氧化氢酶活性 [mL/(g·24 h)]
RC	11.79 ± 0.76a	1.25 ± 0.04bcd	0.54 ± 0.07a
RCL	11.04 ± 1.28ab	1.43 ± 0.06ab	0.55 ± 0.02a
RL	11.62 ± 0.50a	1.20 ± 0.10cd	0.47 ± 0.05b
CK	10.12 ± 0.54ab	1.15 ± 0.03d	0.46 ± 0.01b
垄本底	9.90 ± 0.10b	1.17 ± 0.14cd	0.44 ± 0.01b
PC	11.08 ± 0.69ab	1.34 ± 0.15abc	0.55 ± 0.03a
PCL	10.99 ± 0.58ab	1.44 ± 0.04a	0.59 ± 0.01a
PL	10.99 ± 1.31ab	1.25 ± 0.12bcd	0.58 ± 0.04a
PCK	9.68 ± 1.52bc	1.18 ± 0.16cd	0.47 ± 0.02b
平本底	8.34 ± 0.01c	1.10 ± 0.05d	0.45 ± 0.01b

2.2 平作及垄作稻螺蛳共生对水稻光合效应的影响

水稻叶面积指数表现见表 3,在水稻整个生育期表现为先升后降趋势。在孕穗期或齐穗期达到最大值,之后不断下降。垄作栽培模式下,RCL 在各个时期均显著高于其他 3 个处理(齐穗期的 RC 处理除外),最高值 10.35 出现在孕穗期。其他 3 个处理中,RC 处理的最高值 8.76 出现在齐穗期,RL 处理的最高值 8.05 出现在孕穗期,RC 处理与 RL 处理除分蘖期差异显著外,其他各时期差异均不显著。RC 处理在分蘖期、齐穗期、灌浆期均显著高于 CK,而 RL 处理只有分蘖期显著高于 CK。平作栽培

模式下,PCL 处理在整个生育时期均高于其他 3 个处理,且始终显著高于 CK;PCL 处理显著高于分蘖期的 PC 处理和孕穗期的 PL 处理,其他时期与 PL 和 PC 处理均无显著差异。孕穗期 PC 处理显著高于 PL 处理,其他时期二者均无显著差异。PL 处理在分蘖期、灌浆期、成熟期显著高于 PCK,PC 处理则在分蘖期、孕穗期、灌浆期、成熟期均显著高于 PCK。平作栽培的 PL、PCL 及 PCK 处理最高值均出现在齐穗期,分别为 9.62、10.47、8.36,PC 最高值 9.79 则出现在孕穗期。整体而言,垄作栽培模式各处理最高值出现时间早于平作栽培模式,受种养模式影响较小。

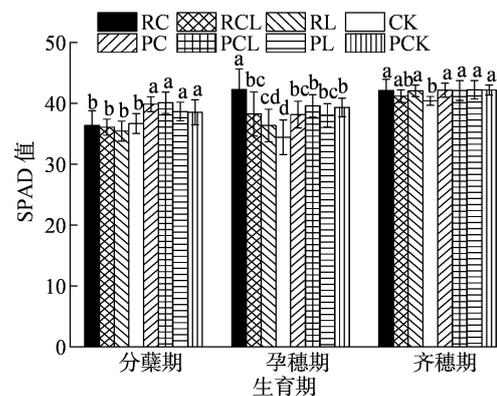
表 3 平作及垄作稻螺蛳共生对水稻叶面积指数的影响

处理	叶面积指数				
	分蘖期	孕穗期	齐穗期	灌浆期	成熟期
RC	5.26 ± 0.47b	7.86 ± 0.36b	8.76 ± 0.40bc	5.12 ± 0.46b	2.77 ± 0.26b
RCL	6.61 ± 0.15a	10.35 ± 1.04a	9.19 ± 0.67ab	6.35 ± 0.08a	3.66 ± 0.59a
RL	4.86 ± 0.17c	8.05 ± 0.39b	7.50 ± 0.24cd	4.69 ± 0.38bc	2.84 ± 0.30b
CK	4.22 ± 0.15d	7.49 ± 0.39b	6.27 ± 0.42d	3.97 ± 0.47c	2.39 ± 0.25b
PL	4.59 ± 0.26cd	8.19 ± 0.27b	9.62 ± 0.52ab	6.89 ± 0.67a	3.78 ± 0.01a
PCL	4.85 ± 0.13c	9.85 ± 0.15a	10.47 ± 0.98a	7.10 ± 0.47a	3.91 ± 0.12a
PC	4.31 ± 0.13d	9.79 ± 0.30a	9.58 ± 1.00ab	6.96 ± 0.72a	3.44 ± 0.36a
PCK	3.80 ± 0.07e	7.44 ± 0.72b	8.36 ± 0.40bc	5.30 ± 0.31b	2.72 ± 0.19b

由图 1 可知,各平作栽培处理的 SPAD 值在分蘖期显著高于垄作栽培处理,同一栽培模式内的处理间无显著差异;分蘖期的平作栽培模式下,PC 和 PCL 处理略高于 PL 处理和 PCK,垄作种养模式显著低于对应的平作种养模式。在孕穗期,RC 和 RCL 处理的 SPAD 值显著高于 CK,RL 处理略高于 CK;平作栽培模式下,PCL 处理高于其他处理,各处理间差异不显著。在齐穗期,PC 和 PL 处理的 SPAD 值显著高于 PCK;垄作栽培模式下,各种养模式的 SPAD 值差异极小。

水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期的光合指标详见图 2。净光合速率指标中,分蘖期垄作栽培的 RC 处理最低,显著低于 CK,其他 6 个处理间差异不显著;孕穗期净光合速率最低的是 RC 处理,最高的是 PCL 处理,RC 处理与 PCL 处理差异显著,其他各处理间差异不显著;在灌浆期,各垄作种养处理表现为 RCL > RC > RL > CK > PCL > PL > PC > PCK,相同栽培条件下的各种养模式间无显著差异。

蒸腾速率指标中,在分蘖期,RC 处理显著低于



柱上标有不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著(P<0.05)。图 2 同

图 1 平作及垄作稻螺蛳共生对水稻 SPAD 值的影响

其他处理,其他各处理间差异不显著;在孕穗期,所有处理间均无显著差异,RCL 和 PCL 处理略高于相同栽培模式下的其他处理;在灌浆期,平作栽培的各处理均显著高于垄作栽培处理,相同栽培模式下的 4 个处理间无显著差异。

气孔导度指标中,在分蘖期,RC 处理显著低于其他所有处理,PCL 处理最高,显著高于 RCL 和 PC

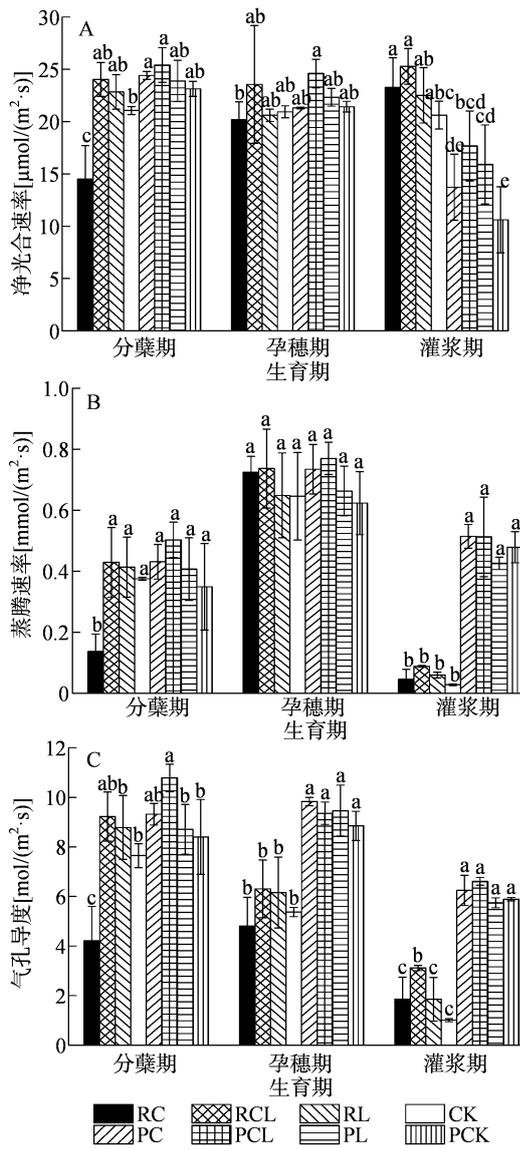


图2 平作及垄作稻螺鳅共生对水稻光合指标的影响

处理以外的其他处理;在孕穗期,相同栽培模式下的 4 个处理间无显著差异,RCL、PCL 处理略高于相同栽培模式下的其他处理,各平作栽培处理均显著

高于垄作栽培处理;在灌浆期,各平作栽培处理均显著高于垄作栽培处理,平作栽培模式下的 4 个处理间无显著差异,垄作栽培模式下,RCL 处理明显高于其他 3 个处理。总体来看,2 种栽培模式下的光合指标表现为稻鳅螺模式 > 稻螺、稻鳅模式、对照。

2.3 平作及垄作稻螺鳅共生对水稻产量的影响

水稻产量表现详见表 4。千粒重指标中,垄作栽培的种养处理小于或等于 CK;平作栽培的 PL、PCL、PC 处理较 PCK 分别增加 1.14、0.98、0.44 g,处理间无显著差异。结实率指标中,PL 处理最高,较 PCK 提高 7 个百分点,其他处理的增幅小于 PL 处理。穗粒数指标中,RC、RCL、RL 处理较 CK 分别增加 29.70、21.34、30.50 粒,平作种养处理均低于 PCK。有效穗数指标中,PL 处理最高,其次是 PC 处理,较 PCK 分别增加 23.3%、20.0%。垄作模式理论产量为 RL > RCL > RC > CK,实际产量为 RL > RC > RCL > CK,RL、RC、RCL 处理较 CK 分别增加 1.47、0.98、0.42 t/hm²。平作模式理论产量表现为 PL > PC > PCK > PCL,实际产量为 PC > PCK > PCL > PL,PC 处理较 PCK 提高 0.5 t/hm²。

3 讨论

3.1 稻螺鳅共生对土壤有机质含量及土壤酶活性的影响

高明等的研究表明,垄作栽培较平作栽培显著提高有机碳含量,促进土壤有机碳积累,使 0~10、10~20 cm 的土壤有机质含量分别提高 14.1、4.2 g/kg^[15]。本研究发现,孕穗期至成熟期平作栽培土壤有机质含量高于垄作栽培,这与前人研究有所差异。吕广动等研究发现,稻田养鱼可提高土壤有机质含量^[16]。由此也可证实,平作栽培模式下,

表 4 平作及垄作稻螺鳅共生对水稻产量及产量构成因素的影响

处理	千粒重 (g)	结实率 (%)	穗粒数 (粒)	有效穗数 (万穗/hm ²)	理论产量 (t/hm ²)	实际产量 (t/hm ²)
RC	24.75 ± 0.77b	77 ± 2ab	180.09 ± 6.13a	294 ± 24.24b	10.19 ± 0.21b	7.77 ± 1.37d
RCL	26.18 ± 0.75ab	78 ± 1ab	171.73 ± 6.11a	308 ± 24.24b	10.89 ± 0.56ab	8.39 ± 0.05bed
RL	26.33 ± 0.94a	77 ± 3ab	180.89 ± 17.89a	308 ± 24.24b	11.37 ± 0.74ab	8.26 ± 1.15cd
CK	26.33 ± 0.54a	76 ± 1ab	150.39 ± 13.29ab	308 ± 24.24b	9.30 ± 1.16bc	6.79 ± 1.38d
PL	26.40 ± 0.16a	81 ± 1a	161.21 ± 20.55ab	370 ± 45.82a	12.74 ± 0.22a	9.97 ± 0.42ab
PCL	26.24 ± 1.33ab	79 ± 8ab	134.33 ± 15.51b	270 ± 36.94b	7.53 ± 0.91c	8.40 ± 0.90bed
PC	25.70 ± 0.30ab	76 ± 1ab	160.41 ± 22.31ab	360 ± 21.97a	11.40 ± 2.62ab	10.10 ± 0.82a
PCK	25.26 ± 0.82ab	74 ± 7a	184.36 ± 11.55a	300 ± 19.70b	10.43 ± 1.19b	9.60 ± 0.65abc

田面富水, 鳅螺均匀活动在稻田内, 代谢及分泌物在稻田中降解, 增加水体溶氧量, 改善土壤通气状况, 加速鳅螺代谢物分解, 提高土壤养分含量。

丁姣龙等的研究表明, 鱼类排泄及分泌物的加入在水稻生长后期提高了土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶的活性^[17]。本研究发现, 种养模式较常规垄作可提高土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶的活性。平作模式的过氧化氢酶活性略高于垄作栽培模式, 可能是平作栽培下, 稻田水分较垄作栽培方式高, 利于过氧化氢酶活性提高。

3.2 稻鳅螺共生对水稻光合效应、产量形成的影响

车阳等对稻虾、稻鳖、稻鳅、稻鲂鱼等模式进行研究, 发现较水稻单作处理的水稻产量显著降低 3.66% ~ 7.54%, 其中稻鸭处理的产量降幅最小^[18]。而一些学者研究发现, 稻田综合种养可稳定水稻产量^[16-17]。本研究发现, 稻鳅螺共生模式下水稻产量提高, 稻鳅、稻螺共生模式具稳产效应, 这与前人研究^[19]有所差异。主要原因可能是田间管理措施均匀一致, 鳅螺在田间活动、觅食, 在一定程度上增加了土壤含氧量, 促进了土壤肥力改善, 因此利于产量形成。此外, 植株光合能力对产量影响巨大, 与叶面积指数、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、SPAD 值密切相关。前人研究发现, 保证水稻齐穗期适当的叶面积指数, 有利于提高水稻叶面积及净光合速率, 优化群体结构及生育进程, 增加光合产物积累, 为水稻产量形成奠定基础^[20]。垄作及平作稻鳅螺共生均可提高水稻光合能力, 利于水稻稳产。陈璐等研究发现, 稻鳅共作对产量影响不显著^[21]。本研究结果与其一致。水稻垄作通过改善土壤理化性质, 提高水稻叶片光合能力, 提高水分利用率, 促进作物产量的提高^[20]。本研究发现, 平作可提高水稻的光合能力, 较垄作栽培方式更有利于产量的形成。主要原因可能是平作下, 稻田一直为淹水状态, 鳅螺在田间均匀活动, 可有效控制杂草发生, 提高水稻光合能力, 利于产量形成。垄作水稻则因垄肩无法处于淹水条件, 易致杂草孳生。

4 结论

平作及垄作稻鳅螺共生模式种养处理提高土壤有机质含量。较水稻单作, 种养模式均可提高土壤脲酶活性(平作 5.93% ~ 22.03%, 垄作 4.35% ~ 24.35%)、蔗糖酶活性(平作 13.53% ~ 14.46%, 垄作 9.09% ~ 16.50%)、过氧化氢酶活性(平作

17.02% ~ 25.53%, 垄作 2.17% ~ 19.57%)、叶面积指数、叶片 SPAD 值、蒸腾速率、气孔导度以及净光合速率。栽培方式对土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶的活性无明显影响, 过氧化氢酶活性表现为平作栽培模式略高于垄作栽培模式; 栽培方式对叶面积指数有明显影响, 分蘖期同一种种养模式下, 垄作栽培处理均显著高于平作栽培处理, 而齐穗期至成熟期平作栽培处理均高于垄作栽培处理; 水稻蒸腾速率及气孔导度表现为平作栽培整体略高于垄作栽培, 分蘖期和孕穗期的净光合速率平作栽培处理略高于垄作栽培处理, 灌浆期垄作栽培处理明显高于平作栽培处理; 水稻有机质含量分蘖期平作栽培处理高于垄作栽培处理, 孕穗期至成熟期均为垄作栽培处理高于平作栽培处理; 水稻 SPAD 值平作栽培前期略高于垄作栽培, 后期差异不明显; 平作栽培下各处理产量整体高于垄作栽培, 平作栽培较利于产量形成, 较水稻单一种植, 稻鳅螺共生具稳产效应。

参考文献:

- [1] Hubbard V C, Jordan D, Stecker J A. Earthworm response to rotation and tillage in a Missouri claypan soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(4): 343 - 347.
- [2] Chen Y Z, Chai S X, Tian H H, et al. 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.
- [3] Dai C T, Liu Y J, Wang T W, et al. Exploring optimal measures to reduce soil erosion and nutrient losses in Southern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 41 - 48.
- [4] Gu Y J, Han C L, Kong M, et al. 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.
- [5] Guo S, Jiang R, Qu H C, et al. Fate and transport of urea - N in a rain - fed ridge - furrow crop system with plastic mulch [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186: 214 - 223.
- [6] 马 丽, 李潮海, 付 景, 等. 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): 156 - 165.
- [7] Graef H, Kiobia D, Saidia P, et al. Combined effects of biochar and fertilizer application on maize production in dependence on the cultivation method in a sub - humid climate [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(22): 2905 - 2917.
- [8] 郑华斌. 水稻垄作梯式栽培的水分利用及其增产机制 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 69 - 74.
- [9] 贾继文, 聂俊华, 李絮花, 等. 蔬菜大棚土壤理化性状与土壤酶活性关系的研究 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 32(4): 427 - 432.
- [10] 杜静静. 不同种植年限果园土壤理化性质与酶活性研究 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2013: 10 - 12.
- [11] 林海雁, 黄倩霞, 邵紫依, 等. 养殖虎纹蛙稻田土壤酶活性及主

岳瑶琴,王敏娟,赵志刚. 埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜复交后代遗传规律分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):89-96.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.012

埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜复交后代遗传规律分析

岳瑶琴¹, 王敏娟², 赵志刚¹

(1. 青藏高原种质资源研究与利用实验室/青海大学农林科学院/青海省春油菜工程技术研究中心, 青海西宁 810016;
2. 青海省柴达木农垦集团有限公司, 青海西宁 810016)

摘要:为进一步揭示埃塞俄比亚芥、芥菜型油菜和甘蓝型油菜种间远缘复交后代材料的遗传变异规律,以埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜杂交,再与甘蓝型油菜复交的后代群体(复交 F₁ 代~复交 F₃ 代)为材料,对复交后代表型偏甘蓝型油菜变异群体进行花粉可染性、形态、细胞学方面的研究。花粉可染性分析表明,复交的远缘杂交后代育性极差;形态学分析表明,利用人工去杂,杂种后代中偏甘蓝型油菜占比随世代增长而增加;亲和性分析表明,复交 F₃ 代群体的结角率与 F₁ 代、复交 F₂ 代相比呈极显著差异,但各代间亲和指数间无显著性水平;细胞学研究表明,复交 F₂ 代、F₃ 代群体中各存在 1 个 2n = 38 条的植株个体,复交后代群体中多数植株都为少于 38 条染色体的亚倍体,其减数分裂配对结果显示,复交 F₃ 代群体中(600 × 908) × 青油 14 号的染色体配对构型为 2.43 I + 16.26 II + 0.35 III,染色体数比其他复交世代和其余杂交组合更接近于 19 II。

关键词:埃塞俄比亚芥;芥菜型油菜;远缘杂交;花粉可染性;细胞学分析;配对构型

中图分类号:S634.303 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0089-08

油菜在植物分类上属于十字花科芸薹属,以收获种子榨油为主要目的,是我国重要的油料作物,也是我国食用油主要来源之一,其产油量占国产油料作物产油量 50% 以上^[1]。埃塞俄比亚芥 (*Brassica carinata*, 2n = 4x = 34) 是由黑芥 (BB, n =

8) 与甘蓝 (CC, n = 9) 通过自然界无人工干预条件下种间杂交并加倍产生的复合种,简称埃芥。埃芥是人工合成异源六倍体的“桥梁”,通过回交和选择的手段,可将埃芥自身的优良抗逆基因较为容易地转到重要的油料作物和蔬菜中去^[2-5]。芥菜型油菜 (*Brassica juncea*, 2n = 4x = 36), 是由黑芥 (BB, n = 8) 与白菜 (AA, n = 10) 通过自然界无人工干预条件下种间杂交并加倍产生的复合种。二者拥有较多优良的农艺性状,如根深、叶片蜡质层厚、抗角果开裂、耐高温、耐旱、抗倒伏,抗病虫害^[6-7]、耐高湿、黄籽^[8-9]、早熟^[10]等特性,且种质资源丰富^[2,11]。

随着甘蓝型油菜育种工作的深入开展,高产、

收稿日期:2024-03-19

基金项目:国家科技重大专项(编号:2022ZD0401001);青海省自然科学基金—创新团队项目(编号:2022-ZJ-902)。

作者简介:岳瑶琴(1997—),女,甘肃兰州人,硕士,主要从事春油菜分子细胞遗传学研究。E-mail:3217560156@qq.com。

通信作者:赵志刚,博士,研究员,主要从事春油菜种质资源创新研究。E-mail:13897474887@126.com。

要养分含量特征[J]. 核农学报,2018,32(4):802-808.

[12] 李升东,王法宏,司纪升,等. 垄作小麦群体的光分布特征及其对不同叶位叶片光合速率的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,17(3):465-468.

[13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[14] Guan D H, Al-Kaisi M M, Zhang Y S, et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. Field Crops Research,2014,157:89-97.

[15] 高明,张磊,魏朝富,等. 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):343-348,354.

[16] 吕广动,黄璜,梁玉刚,等. 紫云英还田+稻鱼共生对水稻土壤养

分及产量的影响[J]. 西南农业学报,2020,33(8):1729-1735.

[17] 丁蛟龙,陈璐,王忍,等. 鱼排泄物与分泌物对水稻土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2021,44(2):74-79.

[18] 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.

[19] 孙永健,郑洪帆,徐徽,等. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量[J]. 农业工程学报,2014,30(20):10-18.

[20] 梁玉刚,胡文彬,刘焯,等. 中国垄作栽培模式的研究进展[J]. 生态学杂志,2022,41(7):1414-1422.

[21] 陈璐,陈灿,黄璜,等. 不同稻鱼模式对再生稻产量和品质的影响[J]. 河南农业科学,2021,50(12):32-38.