

引用格式:

钟康裕, 唐志伟, 熊瑞, 周文涛, 张雅兰, 欧阳宁, 龙攀, 徐莹, 傅志强. 垄厢栽培对水稻根系及土壤肥力的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(6): 631–637.

ZHONG K Y, TANG Z W, XIONG R, ZHOU W T, ZHANG Y L, OUYANG N, LONG P, XU Y, FU Z Q. Effects of ridge and box cultivation on rice roots and soil fertility[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(6): 631–637.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



垄厢栽培对水稻根系及土壤肥力的影响

钟康裕^{1,2}, 唐志伟^{1,2}, 熊瑞^{1,2}, 周文涛^{1,2}, 张雅兰^{1,2},
欧阳宁^{1,2}, 龙攀^{1,2}, 徐莹^{1,2}, 傅志强^{1,2*}

(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实验站, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以中嘉早 17(早稻季)和泰优 390(晚稻季)为试验材料, 2019 年在湖南省浏阳市开展大田小区试验, 探究 3 种栽培方式(垄作栽培、厢作栽培、平作栽培)对水稻根系特性、土壤肥力及水稻产量的影响。结果表明: 相比平作, 垄作栽培显著提高了晚稻孕穗期、齐穗期的根总长和根表面积, 其中, 孕穗期的根总长和根表面积分别显著提高 49.43%、52.14%, 齐穗期的根总长和根表面积分别提高 46.13%、36.90%; 厢作栽培降低了晚稻分蘖盛期的根总长和根表面积, 分别显著降低 33.75%、31.39%; 垄作栽培提高了早、晚稻孕穗期、齐穗期的根系伤流量, 其中, 早稻孕穗期、齐穗期的根系伤流量分别显著提高 73.31%、101.14%, 晚稻孕穗期、齐穗期的根系伤流量分别显著提高 92.81%、52.22%; 与平作相比, 垄作栽培显著提高早、晚季稻田土壤脲酶活性、0~20 cm 土层中有机碳的含量以及晚稻季>5~20 cm 土层中碳氮比值, 厢作栽培显著降低了晚稻>5~10 cm 土层中有机碳含量; 相比平作栽培, 垄作栽培增加了早、晚稻有效穗数与每穗总粒数, 产量分别提高了 30.20%和 10.75%。综上, 相比平作和厢作, 垄作栽培更有利于提升稻田土壤地力和提高双季稻产量。

关键词: 水稻; 垄作栽培; 厢作栽培; 土壤酶; 根系特性

中图分类号: S511.047

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)06-0631-07

Effects of ridge and box cultivation on rice roots and soil fertility

ZHONG Kangyu^{1,2}, TANG Zhiwei^{1,2}, XIONG Rui^{1,2}, ZHOU Wentao^{1,2}, ZHANG Yalan^{1,2},
OUYANG Ning^{1,2}, LONG Pan^{1,2}, XU Ying^{1,2}, FU Zhiqiang^{1,2*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Ministry of Education, Scientific Observation and Experimental Station of Crop Cultivation in Central China, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: To investigate the effects of three cultivation methods(ridge cultivation, box ditch cultivation, flat cultivation(conventional)) on rice root characteristics, soil fertility and rice yield, we performed a field plot experiment in Liuyang City, Hunan Province by use of Zhongjiazao 17(early rice season) and Taiyou 390(late rice season). The results showed that compared with flat cultivation, ridge cultivation had more of the total root length and root surface area from booting stage to full heading stage of late rice season, which were 49.43%, 46.13% and 52.14%, 36.90% respectively. The total root length and root surface area at the peak tillering stage in the late rice season were fewer by 33.75% and 31.39%, respectively. The ridge cultivation increased root bleeding volume from booting stage to full heading stage in early and late seasons by 73.31%, 101.14% and 92.81%, 52.22% respectively. Meanwhile, compared with flat cultivation, the ridge cultivation significantly increased soil urease activity in early and late rice fields as well as the content of organic carbon in 0-20 cm soil layer in early and late season. The box cultivation significantly decreased the content of

收稿日期: 2022-02-21

修回日期: 2022-09-22

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX20190516); 湘北水稻生态优质技术集成与示范项目(2019YFD0301003)

作者简介: 钟康裕(1998—), 男, 湖南桃江人, 硕士研究生, 主要从事水稻高效高产栽培研究, 98125149qq.com; *通信作者, 傅志强, 博士, 教授, 主要从事多熟制种植模式优化与碳氮循环、稻田生态种养研究, zqf_cis@126.com

organic carbon in >5-10 cm soil layer in late season with no significant difference in total nitrogen content in 0-10cm soil layer of rice fields in early and late rice seasons. In >10-20 cm soil layer of late rice season, flat cultivation owned the highest total nitrogen content, which was significantly higher than that in other treatments(47.22%-55.88%). In addition, ridge culture could increase the ratio of carbon and nitrogen in the >5-20 cm soil layer of late rice season and the effective panicles and total grains per panicle in early and late rice seasons, while the box cultivation increased the total grains per panicle in early and late rice seasons resulting the increased yield. In conclusion, the ridge cultivation was in favor of increasing the soil fertility of rice fields and the yield of double cropping rice.

Keywords: rice; ridge cultivation; box cultivation; soil enzyme; root characteristics

传统水稻栽培耗水量大, 占农业用水 70%以上。水资源短缺、用水浪费、农田抛荒以及气候异常等现象的发生是制约水稻生产的几大难题^[1]。随着稻田生态种养发展以及南方冷浸田栽培措施的改良, 垄作、厢作在水稻栽培上的应用越来越广泛^[2-3]。

已有研究^[4]证实, 垄作栽培对水稻根系形态结构的形成具有一定的促进作用。水稻根系形态结构受栽培措施(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(光照、温度、氧气、土壤质地等)等因素的影响^[5]。土壤有机碳、酶活性是评价土壤肥力的重要指标, 耕作方式可影响土壤肥力指标的变化^[6-8]。研究^[9-10]表明, 土壤酶对耕作方式比较敏感, 耕作方式对土壤酶活性会产生直接或间接的影响; 土壤酶活性在一定程度上能代表土壤中物质代谢的旺盛程度, 反映土壤微生物活性。李辉等^[11]认为垄作免耕能显著提高土壤有机碳含量和储量以及微生物生物量碳含量; 秸秆覆盖、垄作为主的保护性耕作在保土、保水、改善土壤肥力、提高作物产量方面的效益显著。之前有关垄作栽培的研究大多是关于垄作与其他栽培技术的配合^[12-14], 而关于垄作、厢作和平作栽培方式对双季稻根系特性和土壤肥力影响的研究鲜见报道。本研究中, 笔者探讨 3 种栽培方式对水稻根系、稻田土壤酶活性、碳氮含量和产量的影响, 旨在分析垄厢栽培的作用效果和增产机制。

1 试验地概况

于 2019 年 3—12 月在湖南省浏阳市湖南农业大学教学科研实习基地(113°50'16"E, 28°18'41"N)开展试验。土壤类型为壤土, 肥力中等。0~20 cm 土壤基本理化性质: pH 值 5.88, 碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量分别为 164.50、75.50、93.33、28.30 mg/kg。

2 材料和方法

2.1 供试材料

供试早稻品种为中嘉早 17, 晚稻品种为泰优 390。

2.2 试验设计

试验设 3 个处理: 垄作栽培(LZ)、厢作栽培(XZ)、平作(常规)栽培(PZ)。3 次重复, 共 9 个小区, 每个小区 24 m²。采用随机区组设计。小区四周筑田埂, 垄高 30 cm, 宽 40 cm, 并用黑色薄膜覆盖。

垄作栽培: 垄宽 60 cm, 沟宽 10 cm, 沟深 20 cm, 垄高 20 cm, 比平作栽培的平面高出 20 cm。垄顶与垄坡斜面成 45°; 垄顶栽 2 行, 垄坡斜面分别栽 2 行; 四周开沟, 每小区 5 条垄, 每条垄栽 6 行, 株行距 10 cm×23 cm。每小区栽植 780(30×26)株。

厢作栽培: 厢宽 80 cm, 沟宽 10 cm, 沟深 20 cm, 厢面与平作栽培平齐; 四周开沟, 每小区 4 条厢; 每厢栽 5 行, 株行距 16 cm×20 cm。每小区栽植 520(20×26)株。

平作栽培: 按常规栽培方法进行, 株行距 15 cm×20 cm。每小区栽植 520(20×26)株。

早稻分别施 N、P₂O₅、K₂O 120、60、120 kg/hm², 晚稻分别施 N、P₂O₅、K₂O 150、90、120 kg/hm²。氮肥作基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为 5:3:2; 磷肥作基肥一次性施入; 钾肥按基肥 50%、分蘖肥 50% 施用。水分管理: 平作栽培插秧后灌水层 3 cm; 垄作和厢作栽培保持水满厢沟, 与平作栽培水面齐平; 各生育时期按当地常规水分管理方法进行。晚稻栽培采用免耕的方式, 在早季稻茬旁插秧。早稻于 3 月 24 日播种、7 月 22 日收获; 晚稻于 7 月 25 日插秧、10 月 22 日收获。

2.3 测定项目与方法

2.3.1 根系特性的测定

分别于早、晚稻分蘖盛期、孕穗期、齐穗期进行取样,按平均分蘖数选取 3 株基本一致的水稻植株,用清水将根系冲洗干净,用自封袋带回室内分析。根总长、根表面积、根平均直径和根体积采用 EPSON Expression 11000XL 3.49 根系扫描仪进行图像扫描;采用 WinRHIZO 2012 根系分析系统软件进行分析和计算。

采用切断自然法收集水稻根系的伤流液^[15],分别于早、晚季分蘖盛期、孕穗期、齐穗期进行。各小区按平均分蘖数选取 3 株基本一致的水稻植株,距离地面约 15 cm 处用剪刀剪去植株地上部分,用 3 g 脱脂棉覆盖切口并压实,再用保鲜袋从上至下包裹,下端绑扎橡皮筋,收集伤流液。收集时间为当日 18:30 至次日 6:30,随后带回称重。收集后的质量与收集前的质量的差值即为水稻根系的伤流液质量。

2.3.2 土壤肥力的测定

早、晚稻收获后,各小区按“S”形取样法取耕作层土壤,垄作栽培、厢作栽培分别在垄面(包含垄顶)、厢面取土,每小区各取 5 个点。取 0~20 cm 土层测定土壤酶活性;取 0~5 cm、>5~10 cm、>10~20 cm 土层测定土壤有机碳含量、全氮含量。采用重铬酸钾-外加热法、AA3 连续流动分析仪氮磷联测法、

靛酚蓝比色法、KMnO₄ 滴定法及 3,5-二硝基水杨酸比色法分别测定土壤有机碳、全氮含量和脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性^[16-17]。

2.3.3 产量及产量构成因素的测定

分别于成熟期在各小区割取 2 m² 稻株,单独收获后晒干、称重,计算实际产量;各小区连续数 20 株,计算平均单株有效穗数,再按平均单株有效穗数选择具有代表性的植株 3 株,测定每穗总粒数、结实率、千粒质量,计算理论产量。

2.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理;采用 Origin Pro 2021 制作图表;采用 SPSS 20.0 进行统计分析和方差分析,选用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 垄厢栽培对水稻根系生长特性的影响

3.1.1 对双季稻单株根总长和根表面积的影响

由表 1 可知,早稻孕穗期,根总长以垄作栽培的最高,分别显著高于平作栽培、厢作栽培的 49.14%、31.15%,其中平作栽培与厢作栽培处理的差异不显著;齐穗期,根总长以厢作栽培处理的最低,分别比平作栽培、垄作栽培的低 46.37%、42.06%。在早稻各生育时期,根表面积均以垄作栽培处理的最高,但与其他处理差异不显著。

表 1 不同栽培方式下双季稻根总长和根表面积

季别	处理	根总长/cm			根表面积/cm ²		
		分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期
早稻	平作	187.67±31.08	(242.87±26.43)b	(457.06±45.38)a	92.37±3.75	133.42±21.30	157.56±17.77
	垄作	206.15±36.07	(362.21±23.55)a	(423.07±47.04)a	107.12±16.13	149.65±2.90	168.18±20.92
	厢作	179.26±7.57	(276.17±52.17)b	(245.13±30.77)b	86.39±10.33	136.27±31.47	149.08±27.99
晚稻	平作	(626.22±104.04)a	(538.45±51.84)b	(709.15±125.56)b	(394.99±56.51)a	(211.12±23.89)b	(239.30±33.71)b
	垄作	(512.98±64.37)ab	(804.61±20.64)a	(1036.26±44.16)a	(306.02±54.41)ab	(321.19±14.56)a	(327.61±14.17)a
	厢作	(414.89±43.69)b	(792.69±13.17)a	(774.54±53.11)b	(271.02±24.73)b	(294.20±17.88)a	(255.44±27.81)b

同季同列数据后不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

在晚稻分蘖盛期,根总长与根表面积均以厢作栽培处理最低,较平作栽培处理分别显著降低 33.75%和 31.39%,与垄作栽培处理的差异不显著;在孕穗期,垄作栽培处理的根总长与根表面积分别显著高于平作栽培处理 49.43%和 52.14%,厢作栽

培处理的分别高于平作处理 47.22%和 39.35%,但垄作栽培与厢作栽培处理的差异不显著;在齐穗期,根总长与根表面积均以垄作栽培处理的最高,平作栽培与厢作栽培处理的差异不显著,垄作栽培的根总长显著高于平作栽培、厢作栽培 46.13%、33.79%;

根表面积显著高于平作栽培、厢作栽培 36.90%、28.25%。

3.1.2 对双季稻根平均直径和根体积的影响

由表 2 可知,早稻分蘖盛期至齐穗期,随着生育时期的推进,各处理根平均直径、厢作栽培处理根体积呈先升高后降低的趋势;平作栽培与垄作栽

培处理根体积呈逐渐升高的趋势。早稻分蘖盛期,根平均直径以垄作栽培处理的最高,显著高于厢作栽培处理 12.90%,但与平作栽培处理的差异不显著。早稻齐穗期,垄作栽培根体积显著高于厢作栽培处理 82.94%,但与平作栽培处理差异不显著。

表 2 不同栽培方式下双季稻根平均直径和根体积

季别	处理	平均根直径/mm			根体积/cm ³		
		分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期
早稻	平作	(0.96±0.03)ab	1.39±0.21	1.10±0.03	7.32±0.70	7.65±2.79	(8.65±1.14)ab
	垄作	(1.05±0.03)a	1.32±0.11	1.28±0.01	8.34±1.06	9.96±1.02	(10.72±1.48)a
	厢作	(0.93±0.08)b	1.57±0.19	1.22±0.17	6.66±1.37	10.80±3.33	(5.86±2.14)b
晚稻	平作	1.01±0.09	1.25±0.19	1.08±0.07	9.98±1.64	(6.69±1.70)b	6.45±0.80
	垄作	0.93±0.03	1.29±0.04	1.00±0.06	7.37±1.73	(10.38±0.99)a	8.34±0.78
	厢作	1.05±0.14	1.19±0.05	1.02±0.06	7.13±1.43	(8.72±0.92)ab	6.79±1.23

同季同列数据后不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

晚稻 3 个生育时期各处理的根平均直径差异不显著,分蘖盛期与齐穗期根体积的差异也不显著。在晚稻孕穗期,根体积以垄作栽培处理的最高,显著高于平作栽培处理 55.16%,但与厢作栽培处理的差异不显著。

3.1.3 对双季稻植株根伤流液的影响

由表 3 可知,早稻各生育时期根系伤流强度均以垄作栽培处理的最高,平作栽培处理的次之,厢

作栽培处理的最低。分蘖盛期,垄作栽培的根系伤流强度显著高于厢作栽培处理 62.11%,但与平作栽培处理的差异不显著;孕穗期,垄作栽培处理的根系伤流强度分别显著高于平作栽培、厢作栽培 73.31%、93.91%;齐穗期,垄作栽培处理的根系伤流强度分别显著高于平作栽培、厢作栽培 101.14%、129.22%;平作栽培与厢作栽培处理的差异不显著。

表 3 不同栽培方式下双季稻根系伤流强度

季别	处理	根系伤流强度		
		分蘖盛期	孕穗期	齐穗期
早稻	平作	(37.13±7.20)ab	(35.85±10.99)b	(34.20±11.15)b
	垄作	(45.65±4.49)a	(62.13±9.70)a	(68.79±3.73)a
	厢作	(28.16±0.91)b	(32.04±2.68)b	(30.01±7.32)b
晚稻	平作	(61.31±13.38)b	(35.72±8.28)c	(73.59±15.97)b
	垄作	(76.56±14.66)ab	(68.87±4.33)b	(112.02±1.55)a
	厢作	(96.91±3.64)a	(82.95±6.16)a	(108.08±4.22)a

同季同列数据后不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

晚稻分蘖盛期与孕穗期,根系伤流强度以厢作栽培处理的最高,垄作栽培次之,平作栽培处理的最低;在齐穗期,根系伤流强度以垄作栽培处理的最高,厢作栽培处理的次之,平作栽培处理的最低。在晚稻分蘖盛期,厢作栽培的根系伤流强度显著高于平作栽培处理 58.07%,但与垄作栽培处理的差异不显著;在孕穗期,厢作栽培处理的根系伤流强度显著高于其他处理,垄作栽培显著高于平作栽培处

理 92.81%;在齐穗期,垄作栽培与厢作栽培处理的根系伤流强度差异不显著,分别显著高于平作栽培处理 52.22%和 46.87%。

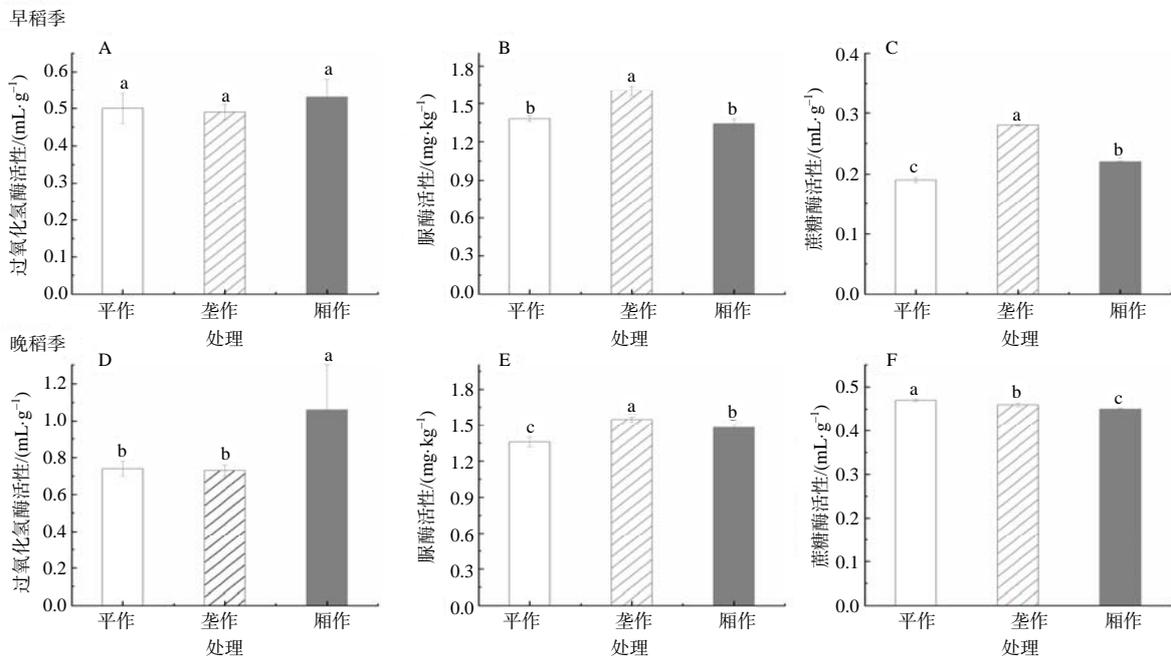
3.2 粪廂栽培对双季稻土壤酶活性的影响

由图 1 可知,早稻季土壤中各处理的过氧化氢酶活性差异不显著;脲酶活性以垄作栽培处理的最高,显著高于其他处理,但平作栽培与厢作栽培差异不显著;蔗糖酶活性以垄作栽培处理的最高,显

著高于其他处理，厢作栽培处理的次之，显著高于平作栽培处理。

晚稻土壤中的过氧化氢酶活性以厢作栽培处理的最高，显著高于其他处理，垄作栽培与平作栽培的差异不显著；脲酶活性以垄作栽培处理的最

高，显著高于其他处理，厢作栽培处理的次之，显著高于平作栽培处理；蔗糖酶活性以平作栽培处理的最高，显著高于其他处理，垄作栽培处理的次之，显著高于厢作栽培处理。



柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

图 1 不同栽培方式双季稻的土壤酶活性

Fig.1 Soil enzyme activities in double cropping rice by the studied three cultivation methods

3.3 垄厢栽培对双季稻土壤碳、氮含量的影响

由表 4 可知，早稻季 0~5 cm 土层中，有机碳含量以厢作栽培的最高，分别显著高于平作栽培、垄作栽培 19.16%、10.84%；>5~10 cm 土层中，厢作栽培的有机碳含量分别高于平作栽培、垄作栽培 26.84%、10.84%；在>10~20 cm 土层中，垄作栽培与厢作栽培的有机碳含量分别显著高于平作栽培处理 27.35%、35.26%。在早稻 0~5 cm、>5~10 cm、>10~20 cm 土层中，各处理全氮含量差异不显著。在 0~5 cm 土层中，全氮含量以平作栽培处理的最

高，垄作栽培处理的次之，厢作栽培处理的最低；在>5~10 cm、>10~20 cm 土层中，全氮含量均以垄作栽培处理的最高，厢作栽培处理的次之，平作栽培处理的最低。在早稻 0~5 cm 土层中，土壤碳氮比以厢作栽培处理的最高，分别显著高于平作栽培、垄作栽培 43.13%、24.03%，垄作栽培与平作栽培处理的差异不显著；在>5~10 cm、>10~20 cm 土层中，碳氮比均以厢作栽培处理的最高，平作栽培处理的次之，垄作栽培处理的最低。

表 4 不同栽培方式早晚季不同土层的土壤碳氮含量

Table 4 Soil carbon and nitrogen content in different soil layers in early and late seasons by the studied three cultivation methods

季别 处理	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)			全氮含量/(g·kg ⁻¹)			碳氮比		
	0~5 cm	>5~10 cm	>10~20 cm	0~5 cm	>5~10 cm	>10~20 cm	0~5 cm	>5~10 cm	>10~20 cm
早稻	平作 (16.91±0.14)c	(16.69±0.59)c	(13.64±0.28)b	1.99±0.10	1.50±0.07	1.48±0.63	(8.51±0.50)b	11.13±0.90	10.47±4.60
	垄作 (18.18±0.21)b	(19.10±0.27)b	(17.37±0.35)a	1.86±0.19	1.85±0.20	1.82±0.25	(9.82±1.03)b	10.40±1.06	9.64±1.33
	厢作 (20.15±0.14)a	(21.17±0.44)a	(18.45±0.86)a	1.67±0.17	1.77±0.25	1.70±0.07	(12.18±1.39)a	12.11±1.69	10.86±0.90
晚稻	平作 (18.48±0.49)b	(17.56±0.24)b	(15.61±0.33)b	1.92±0.64	2.12±0.43	(2.12±0.40)a	10.43±3.74	(8.51±1.59)b	(7.54±1.45)b
	垄作 (19.72±0.05)a	(19.32±0.09)a	(19.16±0.28)a	1.96±0.35	1.52±0.30	(1.44±0.20)b	10.29±1.76	(13.11±3.03)a	(13.44±1.73)a
	厢作 (20.34±0.61)a	(12.59±0.05)c	(15.92±0.46)b	1.77±0.25	1.73±0.10	(1.36±0.13)b	11.67±1.83	(7.28±0.46)b	(11.82±1.26)a

同季同列数据后不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

晚稻季 0~5 cm 土层中, 垄作栽培与厢作栽培处理的有机碳含量分别显著高于平作栽培处理 6.71%、10.06%; 在>5~10 cm 土层中, 有机碳含量以垄作栽培处理的最高, 显著高于平作栽培、厢作栽培 10.02%、53.46%, 平作栽培处理的次之, 显著高于厢作栽培处理 39.48%; 在>10~20 cm 土层中, 有机碳含量以垄作栽培处理的最高, 显著高于其他 2 个处理, 其中厢作栽培与平作栽培处理的差异不显著。在晚稻 0~5 cm、>5~10 cm 土层中, 各处理全氮含量差异不显著; 在>10~20 cm 土层中, 全氮含量以平作栽培处理的最高, 显著高于垄作栽培、厢作栽培 47.22%、55.88%, 其中垄作栽培与厢作栽培处理的差异不显著。在晚稻 0~5 cm 土层中, 各处理碳氮比差异不显著, 其中以厢作栽培处理的最高, 平作栽培处理的次之, 垄作栽培处理的最低; 在>5~10 cm 土层中, 碳氮比以垄作栽培处理的最

高, 显著高于其他 2 个处理, 其中平作栽培与厢作栽培的差异不显著; 在>10~20 cm 土层中, 垄作栽培与厢作栽培处理的碳氮比显著高于平作栽培处理 78.25%、56.76%。

3.4 垄厢栽培对双季稻产量及产量构成因素的影响

由表 5 可知, 早稻产量以垄作栽培处理的最高, 厢作栽培处理的次之, 平作栽培处理的最低, 垄作、厢作栽培处理的实际产量分别比平作提高 30.20%、5.34%。垄作栽培和厢作栽培处理的有效穗数分别高于平作栽培处理 46.14% 和 29.22%; 每穗总粒数以垄作栽培处理的最高, 厢作栽培处理的次之, 平作栽培处理的最低; 结实率和千粒质量以平作栽培处理的最高, 垄作栽培处理的次之, 厢作栽培处理的最低。

表 5 不同栽培方式双季稻产量及构成因素

Table 5 Yield and its components of double cropping rice by the studied three cultivation methods

季别	处理	有效穗数/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗总粒数	结实率/%	千粒质量/g	理论产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	实际产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
早稻	平作	(342.20 \pm 32.9)b	107.91 \pm 13.37	72.20 \pm 5.42	25.41 \pm 0.53	(6.75 \pm 0.99)b	5.43 \pm 1.07
	垄作	(500.10 \pm 15.6)a	120.24 \pm 5.87	65.05 \pm 9.51	24.98 \pm 0.67	(9.72 \pm 0.98)a	7.07 \pm 1.10
	厢作	(442.20 \pm 38.6)a	113.04 \pm 3.56	61.88 \pm 4.82	24.67 \pm 0.43	(7.61 \pm 0.51)b	5.72 \pm 0.80
晚稻	平作	421.50 \pm 74.9	117.67 \pm 13.35	68.99 \pm 3.14	26.02 \pm 0.56	8.85 \pm 1.53	6.51 \pm 1.22
	垄作	441.70 \pm 22.7	129.68 \pm 29.41	64.60 \pm 3.47	25.36 \pm 1.13	9.32 \pm 1.81	7.21 \pm 2.03
	厢作	385.90 \pm 30.4	137.30 \pm 10.98	66.36 \pm 3.52	25.36 \pm 0.61	8.92 \pm 1.22	7.07 \pm 1.23

同季同列数据后不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

晚稻季各处理的有效穗数、每穗总粒数、结实率、千粒质量、理论产量和实际产量差异均不显著。晚稻产量以垄作栽培处理的最高, 厢作栽培处理的次之, 平作栽培处理的最低, 垄作栽培和厢作栽培处理的实际产量分别高于平作栽培处理 10.75% 和 8.60%。有效穗数以垄作栽培处理的最高, 平作栽培处理的次之, 厢作栽培处理的最低; 每穗总粒数以厢作栽培处理的最高, 垄作栽培处理的次之, 平作栽培处理的最低; 结实率以平作栽培处理的最高, 厢作栽培处理的次之, 垄作栽培处理的最低; 平作栽培处理的千粒质量高于垄作栽培和厢作栽培处理的。

4 结论与讨论

已有研究^[18]表明, 垄作栽培对水稻根系形态结构的形成均有一定的促进作用, 干湿交替灌溉的环境使水稻根系干物质量、深层根系(10~20 cm)的干物质量、根冠比、根表面积和根数等显著增加, 利于根系形态结构的形成。本研究发现, 与平作相比,

垄作栽培提高了早、晚季孕穗期的根系伤流强度、根总长和根表面积, 其中, 晚稻齐穗期的根系伤流、根总长和根表面积分别显著提高 52.22%、46.13%、36.90%。与平作栽培相比, 厢作栽培降低了早稻季根系伤流强度以及分蘖盛期、齐穗期的根总长和根表面积。万琪慧等^[19]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。本研究结果表明, 垄作栽培能够促进根系生长, 厢作栽培阻碍了早稻的根系生长。可能是因为平作稻田改垄作后, 改善了土壤物理结构和根际环境的通透性, 使植株地上部与地下部协同生长。而厢作栽培长期受淹水的影响, 不利于根系对氧气的吸收, 增加了根系有毒物质的积累, 并对根系产生了毒害作用, 不利于根系的生长。

有研究^[20-22]表明, 垄作免耕能够有效增加稻田表层土壤有机碳。本研究结果表明: 相比平作栽培, 垄作栽培显著提高了双季稻土壤中 0~20 cm 土层中的有机碳含量、早稻>5~20 cm 全氮含量以及早、晚季土壤脲酶活性, 但降低了土壤过氧化氢酶活性;

厢作栽培显著提升了早季季 0~5 cm 土层中有机碳含量和早、晚季稻田土壤过氧化氢酶活性。可见，垄作和厢作栽培均改善了土壤肥力状况。究其原因，可能是垄作改变了原有的土壤结构，提高了耕作面；垄作免耕对土层干扰小，再加上种植密度大，有机残留物和凋落物在表层土壤汇集，表土层积累了更多的腐殖质，提高了有机质含量，有更好的营养源供微生物生长繁殖，进而影响土壤酶活性；厢作栽培增加过氧化氢酶活性是因为厢面长期淹水，免耕表土层中的残茬覆盖物、地下根系等有机质不断经微生物转化进入土壤表层，从而促进了土壤速效养分的储存与释放。

前人^[23-25]研究认为，与常规平作相比，垄作栽培种植模式的产量和产量构成因素均有所增加。本研究结果表明，垄作栽培早、晚稻分别增产 30.20% 和 10.75%。增产的主要原因是单位面积有效穗数的提高。分析其原因，可能是起垄培土、开沟等措施增加了土壤温度和氧气含量，促进根系生长和分蘖发生；另一方面垄作栽培经过微地形改造，加强了通风透光，提高了光能利用率，促进了干物质积累。

综上所述，垄作栽培更有利于改良土壤和水稻生长发育。但要进一步推动垄作稻田的发展，必须加大垄作机具的研发，发展适合于稻田播种、收获的多功能联合作业机械。

参考文献：

- [1] 全妙华, 胡爱生, 欧立军, 等. 耕作方式对水稻光合及根系生理特性的影响[J]. 杂交水稻, 2012, 27(3): 71-75.
- [2] 郭慧娟, 傅志强, 李超, 等. 垄作稻田在生态种养中的应用研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2416-2425.
- [3] 唐志伟, 周文涛, 王勃然, 等. 垄厢栽培对水稻根系特性与土壤物理性质的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3961-3969.
- [4] 郑华斌, 姚林, 刘建霞, 等. 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.
- [5] 梁玉刚, 陈奕沙, 陈璐, 等. 垄作稻鱼鸡共生对水稻根系生长性状的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 89-97.
- [6] 王新建, 张仁陟, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 115-121.
- [7] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [8] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 777-783.
- [9] 李勇军, 曹庆军, 拉民, 等. 不同耕作处理对土壤酶活性的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(3): 111-114.
- [10] 陈娟, 马忠明, 刘莉莉, 等. 不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 667-675.
- [11] 李辉, 张军科, 江长胜, 等. 耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 247-255.
- [12] 陈璐, 陈灿, 黄璜, 等. 厢作免耕下生态种养对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1354-1365.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 唐拴虎, 徐培智, 陈建生, 等. 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(4): 591-596.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 等. 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.
- [19] 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.
- [20] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征[J]. 土壤学报, 2007(2): 235-243.
- [21] 彭娟, 符卓旺, 朱洁, 等. 耕作制度对紫色水稻土有机碳累积及矿化动态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 175-178.
- [22] HUANG X X, GAO M, WEI C F, et al. Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil[J]. Pedosphere, 2006, 16(5): 660-667.
- [23] 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(4): 343-348.
- [24] 慈恩, 王莲阁, 丁长欢, 等. 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 576-586.
- [25] 张婷, 吴普特, 赵西宁, 等. 垄沟种植模式对玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 27-30.

责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳 正