



微生物菌肥与生物炭配施对“非粮化”复耕稻区水稻产量品质和土壤理化性质的影响

胡铁军¹, 斯林林^{2*}

(1. 余姚市农业技术推广服务总站, 浙江 余姚 315400;

2. 浙江省农业科学院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为明确微生物菌肥和生物炭在复耕稻区的最佳配施比例, 以不施肥和常规施肥为对照, 在常规施肥的基础上设置单施微生物菌肥 (1500 kg/hm²) 以及微生物菌肥配施 4 个用量的生物炭 (1500、2250、3000、3750 kg/hm²) 处理, 比较不同处理对水稻经济性状、产量、稻米品质和土壤 pH 值及养分、土壤酶活性、微生物数量的影响, 结果显示, 微生物菌肥配施生物炭均显著提高了水稻经济性状和产量、稻米品质, 而且随生物炭用量的增加呈先升后降的趋势, 利用隶属函数法对经济性状和品质进行综合评价, 显示微生物菌肥配施生物炭 3000 kg/hm² 处理评分最高, 与常规施肥相比, 能显著提高产量 12.59%, 糙米率、精米率、整精米率和胶稠度分别显著提高 0.82%、3.84%、5.24% 和 6.23%, 垩白度显著降低 25.58%。同时两者配施比常规施肥 pH 值及有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别显著提升 0.20 ~ 0.31 及 13.18% ~ 33.48%、5.97% ~ 15.73%、17.81% ~ 39.83%、6.19% ~ 9.48%, 蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和纤维素酶活性分别显著提高 32.64% ~ 54.91%、14.07% ~ 35.56%、87.93% ~ 137.93% 和 5.30% ~ 12.42%, 细菌和放线菌生物量分别显著提高 35.88% ~ 61.57% 和 25.44% ~ 39.91%, 真菌生物量显著减少 7.34% ~ 22.28%, 通过主成分分析综合得分, 微生物菌肥配施生物炭 3750 kg/hm² 处理得分最高, 但以经济性考虑, 推荐常规施肥 + 微生物菌肥 1500 kg/hm² + 生物炭 3000 kg/hm² 的施肥模式应用推广于当地生产中。

关键词: 水稻; 复耕稻区; 微生物菌肥; 生物炭

粮食安全关系着国计民生, 是国家战略安全的重要组成部分。作为粮食生产的载体, 耕地资源是粮食产出的重要保障。自 2020 年 9 月以来, 国务院办公厅连续下发多个关于制止耕地“非粮化”防止耕地“非粮化”的文件。截至 2022 年底, 浙江省宁波市粮食生产功能区“非粮化”面积达 1.449 万 hm², 约占全市耕地面积的 10%, 完成整治优化面积 1.086 万 hm²。但复耕后的耕地耕作层土体的土壤结构差, 有机质含量明显降低, 大、中、微量营养元素失衡, 粮食产量低^[1], 因此如何进行土壤改良修复和水稻增产增效成为当前的研究内容。

微生物菌肥, 是一种低碳、无污染的新型肥料, 含有大量的有机质和多种有益菌, 具有增加土壤中的有机质, 提高土壤肥力, 改善土壤团粒结

构, 防止土壤板结, 提高土壤保肥、保水及抗寒的能力, 同时可阻止病原菌入侵作物, 减少植物的病虫害发生, 增强作物抗病能力^[2]。研究发现^[3], 施用微生物菌肥可提高果蔬的产量, 改善品质。赵冬妍等^[4]发现, 施用微生物菌肥对水稻的株高和产量增加都有不同程度的促进作用, 且能增加土壤有机质含量, 改善土壤环境; Morais 等^[5]也发现, 施用土地杆菌能提高草莓果形指数、总酚含量、总黄酮含量和总可溶性固形物含量。

生物炭是在厌氧或低氧条件下, 对生物有机材料进行高温处理, 将部分物质转化为油和汽后产生的一类富碳产物, 能够改善土壤肥力和结构, 增加土壤有机碳含量, 提高土壤微生物的活性和多样性, 抑制土传病害的发生, 从而增加农作物的产量和质量^[6]。Yu 等^[7]研究发现, 生物炭降解后能转化为土壤的养分, 从而提高作物的产量和品质; 也有研究表明, 农作物产量并非随着生物炭用量增加而一直提高^[8]。Zhu 等^[9]研究也显示, 使用生物炭可以提高矿质元素的有效性和吸收能力, 提升土壤中的养分含量。Steinbeiss 等^[10]研究发现, 生物

收稿日期: 2024-03-07; 录用日期: 2024-03-31

基金项目: 宁波市公益类科技项目 (2023S127)。

作者简介: 胡铁军 (1984-), 高级农艺师, 本科, 从事肥料研究推广工作。E-mail: hutiejunyysw@126.com。

通讯作者: 斯林林, E-mail: sillinlin@zaas.ac.cn。



炭的孔隙和表面可为微生物提供栖息的微环境，从而增加微生物的数量与活性，这为微生物菌肥和生物炭联合施用提供了可能性。

当前的研究主要集中在单一的施用生物炭或微生物菌肥对作物经济性状和土壤质量的影响，对微生物菌肥和生物炭配施的研究相对较少，而研究两者配施对复耕区水稻产量品质以及土壤质量的影响更是鲜见报道。为此笔者通过田间试验设置单施化肥、单施微生物菌肥以及微生物菌肥和不同用量生物炭配施，比较不同处理对水稻产量、稻米品质、土壤养分、土壤酶活性和微生物数量的影响，以期复耕区水稻生产和土壤改良提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验品种和地点

试验于2023年在余姚市阿明优品农场进行，供试水稻品种为‘甬优1540’，供试肥料为茂施“稻坚强”缓释肥（26-10-15），由山东茂施生态肥料有限公司生产；尿素（N 46%），由盘锦中润化工有限公司生产；“金菌冠”微生物菌肥（有机质含量为45%，有效活菌数5亿个/g，含解淀粉芽孢杆菌与地衣芽孢杆菌），由山东金正大生态工程有限公司提供；生物炭原料为水稻秸秆，全碳含量63.15%，全氮含量0.37%，由江苏华丰农业生物工程有限公司提供。试验地块2021年以前种植葡萄，“非粮化”整治后复耕，改为小麦-单季稻轮作，试验前该地块基础理化性质：pH值5.57，有机质含量10.62 g/kg，有效磷含量11.34 mg/kg，速效钾含量109.08 mg/kg，碱解氮含量101.94 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设7个处理，CK1：空白处理，不施任何肥料，CK2：常规施肥处理，T1：常规施肥+微生物菌肥1500 kg/hm²，T2：常规施肥+微生物菌肥1500 kg/hm²+生物炭1500 kg/hm²；T3：常规施肥+微生物菌肥1500 kg/hm²+生物炭2250 kg/hm²；T4：常规施肥+微生物菌肥1500 kg/hm²+生物炭3000 kg/hm²；T5：常规施肥+微生物菌肥1500 kg/hm²+生物炭3750 kg/hm²。常规施肥为基施茂施缓释肥600 kg/hm²，分2次分别追施尿素150 kg/hm²，微生物菌肥施用量按照推荐用量1500 kg/hm²。2023年5月10日播种，6月9日移栽，11月20日收获，7月2日第一次追肥，8月11日第二次追肥，微生物菌肥和生物炭全部一次性基施。每个处理设3次

重复，随机排列，每个小区面积60 m²，单排单灌，防止窜肥。

1.3 调查项目与方法

1.3.1 水稻经济性状调查

每小区固定10丛为观察对象，每7 d调查1次苗分蘖数，成熟期测定产量、穗长、有效穗数、穗粒数、总粒数、千粒重。

1.3.2 稻米品质的测定

水稻成熟后采用五点法在每个小区取30穴植株，用脱粒机单独脱粒后晾干储存3个月，采用砻谷机测定糙米率、精米率和整精米率，通过垩白观察仪计算垩白度，采用近红外谷物分析仪测定精米的蛋白质含量和直链淀粉含量，采用《优质稻谷》（GB 1350—1999）的方法进行胶稠度测定。

1.3.3 不同施肥处理水稻产量品质综合评价

采用模糊数学隶属函数法对不同施肥处理进行综合评价，将测定的每个指标分别代入公式求出相应的隶属函数值，计算每个处理隶属函数的平均值，平均隶属函数值越大，综合品质越好。而垩白度与直链淀粉含量呈负相关，因此用反隶属函数计算其隶属度^[11]。

$$\text{评价公式: } X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中， X 为各处理的某一指标测定值， $X_{\max}$ 为该指标测定值的最大值， $X_{\min}$ 为该指标测定值的最小值。

1.3.4 土壤养分的测定

施肥前采集混合土壤样品，收获后每个小区按照S法采集土样，测土壤pH值及有效磷、速效钾、碱解氮、有机质含量。pH值用电位法测定，有效磷含量用钼蓝比色法测定，速效钾含量用火焰光度法测定，碱解氮含量用碱解-扩散法测定，有机质含量用重铬酸钾容量法测定^[12]。

1.3.5 土壤酶活性和微生物数量测定

土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定，过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定，纤维素酶和蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[13]。微生物数量采用稀释平板计数法^[14]。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量构成因子的影响

从图1可知，施用微生物菌肥T1~T5处理比常规施肥CK2处理，有效穗数显著提高5.07%~12.40%，每穗实粒数显著提高2.87%~10.29%，产量显著提高

8.50% ~ 12.59%; 结实率提高 2.19% ~ 6.63%, 千粒重提高 1.53% ~ 8.16% (除 T1 处理外均有显著差异), 穗长也有显著提高。微生物菌肥和生物炭配施处理 T2 ~ T5 处理与 T1 处理相比有效穗数、每穗实粒数、千粒重分别显著提高 2.58% ~ 6.98%、2.52% ~ 7.21%、

2.65% ~ 6.53%, 结实率除 T5 处理外均无显著差异, T3 ~ T5 处理比 T1 处理产量增加 3.13% ~ 3.76%, 有显著差异。T2 ~ T5 处理之间, 有效穗数和产量最高为 T4 处理, 千粒重和每穗实粒数最高为 T3 处理, 随着生物炭用量的增加均出现先升后降的趋势。

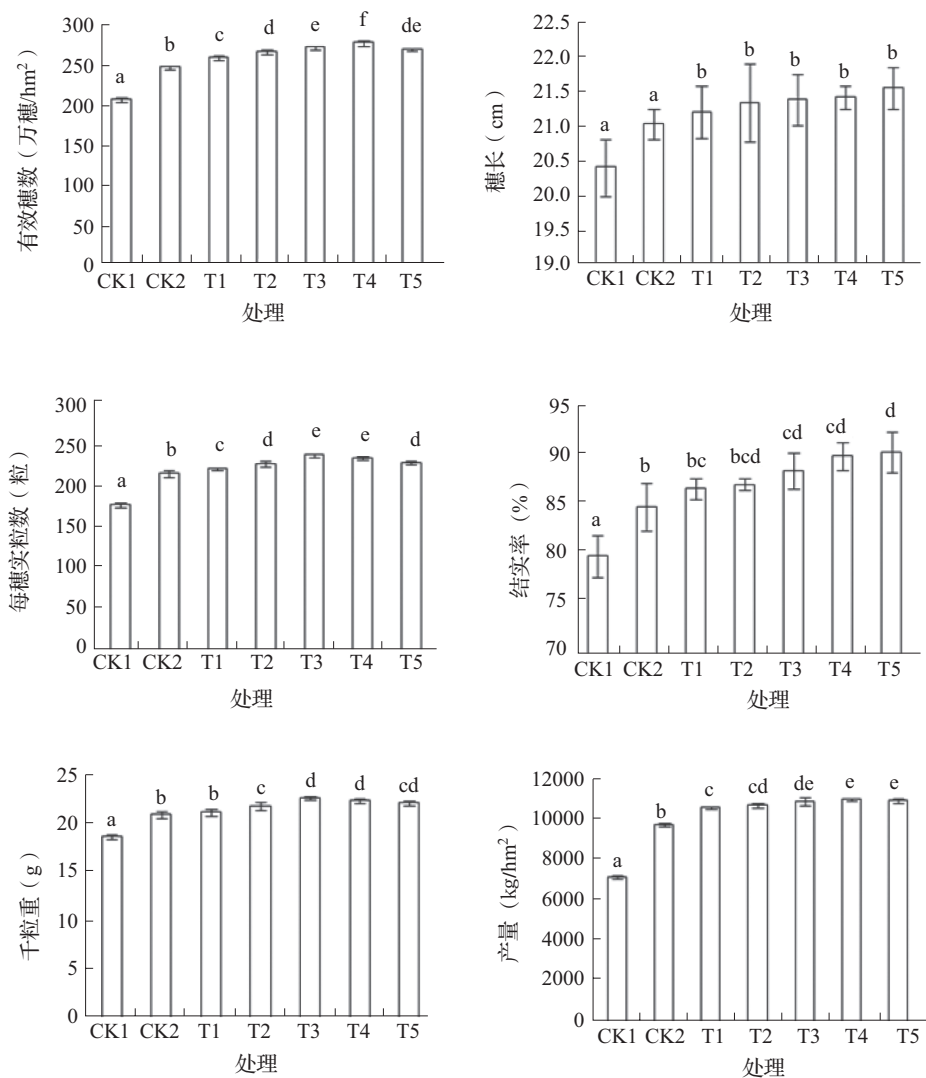


图1 不同处理对水稻产量构成因子的影响

注: 柱上不同小写字母表示差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同处理对稻米品质的影响

由表1可知, 只增施微生物菌肥 T1 处理比常规施肥 CK2 处理精米率增加 1.61%, 整精米率增加 2.02%, 直链淀粉含量降低 4.84%, 胶稠度增加 2.82%, 均有显著差异。微生物菌肥和生物炭配施 T2 ~ T5 处理比 T1 处理整精米率显著提高 1.06% ~ 3.16%, 直链淀粉含量显著降低 3.66% ~ 11.10%, 胶稠度显著提高 1.27% ~ 3.32%, T4 处理比 T1 处理糙米率、精米率

有显著提高, 垩白度显著减低。T2 ~ T5 处理之间指标也有显著差异, 精米率和整精米率最高为 T4 处理, 与 T2 和 T3 处理呈显著差异, 垩白度和直链淀粉含量最低的也为 T4 处理, 与 T2 和 T3 处理均有显著差异, T4 处理比 T2 处理胶稠度显著提高 2.02%, 糙米率显著提高 0.51%, 蛋白质含量无显著差异, 除长宽比外其他指标随着生物炭用量的增加均出现先升后降或先降后升的现象。



表 1 不同处理对稻米品质的影响

处理	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	长宽比	垩白度 (%)	蛋白质含量 (%)	直链淀粉含量 (%)	胶稠度 (mm)
CK1	81.32 ± 0.23a	71.14 ± 0.28a	64.51 ± 0.51a	2.32 ± 0.04a	2.76 ± 0.19e	7.14 ± 0.07a	16.26 ± 0.28c	65.78 ± 0.84a
CK2	82.19 ± 0.19b	72.45 ± 0.22b	67.39 ± 0.23b	2.35 ± 0.04a	2.58 ± 0.11de	7.37 ± 0.32ab	16.95 ± 0.30d	67.45 ± 0.66b
T1	82.37 ± 0.29b	73.62 ± 0.26c	68.75 ± 0.27c	2.38 ± 0.06a	2.43 ± 0.11cd	7.52 ± 0.16abc	16.13 ± 0.29c	69.35 ± 0.16c
T2	82.44 ± 0.13b	73.96 ± 0.10d	69.48 ± 0.32d	2.39 ± 0.05a	2.29 ± 0.07bc	7.63 ± 0.14bc	15.54 ± 0.21b	70.23 ± 0.45d
T3	82.59 ± 0.26bc	74.71 ± 0.11e	69.73 ± 0.28d	2.39 ± 0.04a	2.14 ± 0.06b	7.79 ± 0.27c	15.27 ± 0.25b	70.88 ± 0.20de
T4	82.86 ± 0.15c	75.23 ± 0.044f	70.92 ± 0.41e	2.36 ± 0.04a	1.92 ± 0.11a	7.86 ± 0.14c	14.34 ± 0.24a	71.65 ± 0.38e
T5	82.51 ± 0.18bc	74.32 ± 0.14d	69.46 ± 0.43d	2.37 ± 0.04a	1.90 ± 0.12a	7.67 ± 0.28bc	14.76 ± 0.27a	71.19 ± 0.24e

注：同列不同小写字母表示差异有统计学意义 ($P<0.05$)。下同。

2.3 不同处理对水稻隶属函数分析评价

有效穗数、每穗实粒数、结实率、产量等 13 个指标均是评价水稻品质高低的关键依据，但单一的指标无法客观的评价，需进行综合分析，由表

2 可知，T1 ~ T5 处理综合评分要远高于常规施肥 CK2 处理，而微生物菌肥和生物炭配施 T2 ~ T5 处理比 T1 处理评分均要高，最高为 T4 处理，T3 和 T5 处理评分接近。

表 2 不同处理对水稻隶属函数分析评价

指标	CK1	CK2	T1	T2	T3	T4	T5
有效穗数	0.00	0.57	0.74	0.84	0.92	1.00	0.88
每穗实粒数	0.00	0.63	0.73	0.82	1.00	0.95	0.86
结实率	0.00	0.47	0.65	0.69	0.82	0.96	1.00
千粒重	0.00	0.56	0.65	0.79	1.00	0.94	0.87
产量	0.00	0.68	0.90	0.93	0.98	1.00	0.99
糙米率	0.00	0.56	0.68	0.73	0.82	1.00	0.77
精米率	0.00	0.32	0.61	0.69	0.87	1.00	0.78
整精米率	0.00	0.45	0.66	0.78	0.81	1.00	0.77
长宽比	0.00	0.43	0.86	1.00	1.00	0.57	0.74
垩白度	0.00	0.21	0.38	0.55	0.72	0.98	1.00
蛋白质含量	0.00	0.32	0.53	0.68	0.90	1.00	0.74
直链淀粉含量	0.26	0.00	0.31	0.54	0.64	1.00	0.84
胶稠度	0.00	0.28	0.61	0.76	0.87	1.00	0.92
平均隶属度	0.02	0.42	0.64	0.75	0.87	0.95	0.86
排名	7	6	5	4	2	1	3

2.4 不同处理对土壤理化性质的影响

由表 3 可知，T1 处理与 CK2 处理相比，碱解氮、有效磷、速效钾含量分别增加 2.45%、6.58%、0.97%，但无显著性差异，有机质含量显著增加 7.04%，pH 值显著增加 0.13。T2 ~ T5 处理比 CK2 处理 pH 值增加 0.2 ~ 0.31，有机质含量增加 13.18% ~ 33.48%，碱解氮含量增加 5.97% ~ 15.73%，有效磷含量增加 17.81% ~ 39.83%，速效钾含量增

加 6.19% ~ 9.48%，均有显著性差异。T2 ~ T5 处理比 T1 处理 pH 值增加 0.07 ~ 0.18，有机质含量增加 5.73% ~ 24.70%，碱解氮含量增加 3.43% ~ 12.96%，除 T2 处理外均有显著性差异，有效磷含量显著增加 10.53% ~ 31.20%，速效钾含量显著增加 5.17% ~ 8.42%。各处理中指标均为 T5 处理最高，与 T2 ~ T4 处理相比有效磷和速效钾含量有显著差异。

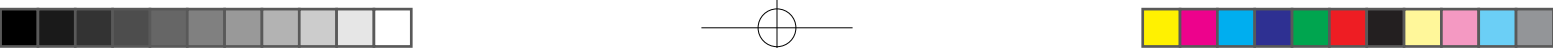


表 3 不同处理对土壤理化性质的影响

处理	pH 值	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK1	5.62 ± 0.04a	10.34 ± 0.48a	98.68 ± 2.14a	11.06 ± 0.95a	116.23 ± 1.13a
CK2	5.58 ± 0.04a	11.08 ± 0.45b	102.36 ± 1.06ab	11.85 ± 0.30ab	118.41 ± 0.75b
T1	5.71 ± 0.02b	11.86 ± 0.46c	104.87 ± 1.90bc	12.63 ± 0.59b	119.56 ± 0.69b
T2	5.78 ± 0.56bc	12.54 ± 0.33c	108.47 ± 2.14cd	13.96 ± 0.48c	125.74 ± 1.36c
T3	5.81 ± 0.05cd	13.28 ± 0.42d	111.81 ± 1.26d	14.83 ± 0.70cd	126.37 ± 0.89c
T4	5.84 ± 0.06cd	13.84 ± 0.21d	116.29 ± 4.23e	15.42 ± 0.35d	126.92 ± 0.96c
T5	5.89 ± 0.03d	14.79 ± 0.49e	118.46 ± 1.32e	16.57 ± 0.69e	129.63 ± 0.69d

2.5 不同处理对土壤酶活性的影响

由表 4 可知,施用微生物菌肥 T1 ~ T5 处理土壤酶活性比常规施肥 CK2 处理均有不同程度的提高,蔗糖酶活性提高 10.45% ~ 54.91%,脲酶提高 9.63% ~ 35.56%,过氧化氢酶活性提高 62.07% ~ 137.93%,纤维素酶活性提高 4.04% ~ 12.42%,均有显著性差异。微生物菌肥与生物炭配施 T2 ~ T5 处理分别比 T1 处理蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、纤维素酶活性显著提高

20.09% ~ 40.25%、19.15% ~ 46.81%、1.21% ~ 8.06%,脲酶活性除 T2 处理外其余处理有显著提高。T2 ~ T5 处理之间酶活性也有显著差异,蔗糖酶和过氧化氢酶活性最高的为 T3 处理,比 T5 要分别显著提高 14.65% 和 26.61%,脲酶活性最高为 T4 处理,比 T5 处理显著提高 8.28%,三者随着生物炭用量的增加呈先增后减的现象,纤维素酶活性为 T5 处理最高,与 T3 和 T2 处理均有显著性差异。

表 4 不同处理对土壤酶活性的影响

处理	蔗糖酶活性 (mg/g)	脲酶活性 (mg/g)	过氧化氢酶活性 (mL/g)	纤维素酶活性 (mg/g)
CK1	12.26 ± 0.20a	1.28 ± 0.06a	0.69 ± 0.06a	53.09 ± 0.27a
CK2	12.53 ± 0.14a	1.35 ± 0.04a	0.58 ± 0.04a	53.21 ± 0.20a
T1	13.84 ± 0.18b	1.48 ± 0.09b	0.94 ± 0.04b	55.36 ± 0.35b
T2	16.62 ± 0.17c	1.54 ± 0.10b	1.12 ± 0.01c	56.03 ± 0.22c
T3	19.41 ± 0.29e	1.76 ± 0.06cd	1.38 ± 0.08d	58.24 ± 0.52d
T4	18.29 ± 0.17d	1.83 ± 0.04d	1.18 ± 0.05c	59.17 ± 0.56e
T5	16.93 ± 0.14c	1.69 ± 0.08c	1.09 ± 0.07c	59.82 ± 0.32e

2.6 不同处理对土壤微生物数量的影响

由图 2 可知,T1 ~ T5 处理的细菌生物量比 CK2 处理显著提高 22.77% ~ 61.57%,真菌生物量显著减少 7.34% ~ 30.13%。细菌生物量、真菌生物量和放线菌生物量 T2 ~ T5 处理比 T1 处理分别显著提高 10.68% ~ 31.60%、11.30% ~ 32.60% 和 13.94% ~ 27.09%。微生物菌肥和生物炭配施各处理中,T5 处理细菌生物量最高,比 T2 ~ T4 处理提高 9.24% ~ 18.90%,且有显著差异,放线菌生物量最高的为 T4 处理,除 T3 处理外其余均有显著差异,T2 ~ T5 处理之间真菌生物量有显著差异,但无明显规律。

2.7 相关性分析

土壤酶活性与土壤 pH 值和养分相关性分析:蔗糖酶活性与 pH 值及碱解氮和有效磷含量有极显著正相关,脲酶活性与 pH 值及碱解氮、有效磷和速效钾

含量有极显著正相关,过氧化氢酶活性与 pH 值有极显著正相关,与碱解氮和有效磷含量有显著相关性,纤维素酶活性与 pH 值和各养分指标均有极显著正相关。

微生物数量与酶活性相关性分析:细菌生物量与蔗糖酶和过氧化酶活性有显著相关,与脲酶和纤维素酶活性有极显著相关,放线菌生物量与酶活性均有极显著正相关,真菌生物量与酶活性无显著相关。

微生物数量与土壤 pH 值和养分相关性分析:细菌生物量与 pH 值及有机质、有效磷和速效钾含量有极显著相关,放线菌生物量与 pH 值及碱解氮、有效磷和速效钾含量有极显著相关,真菌生物量与土壤 pH 值和养分无显著关系。

可见除真菌生物量以外,土壤 pH 值和养分、酶活性和微生物数量除真菌生物量之间均有明显的正相关且相互影响。

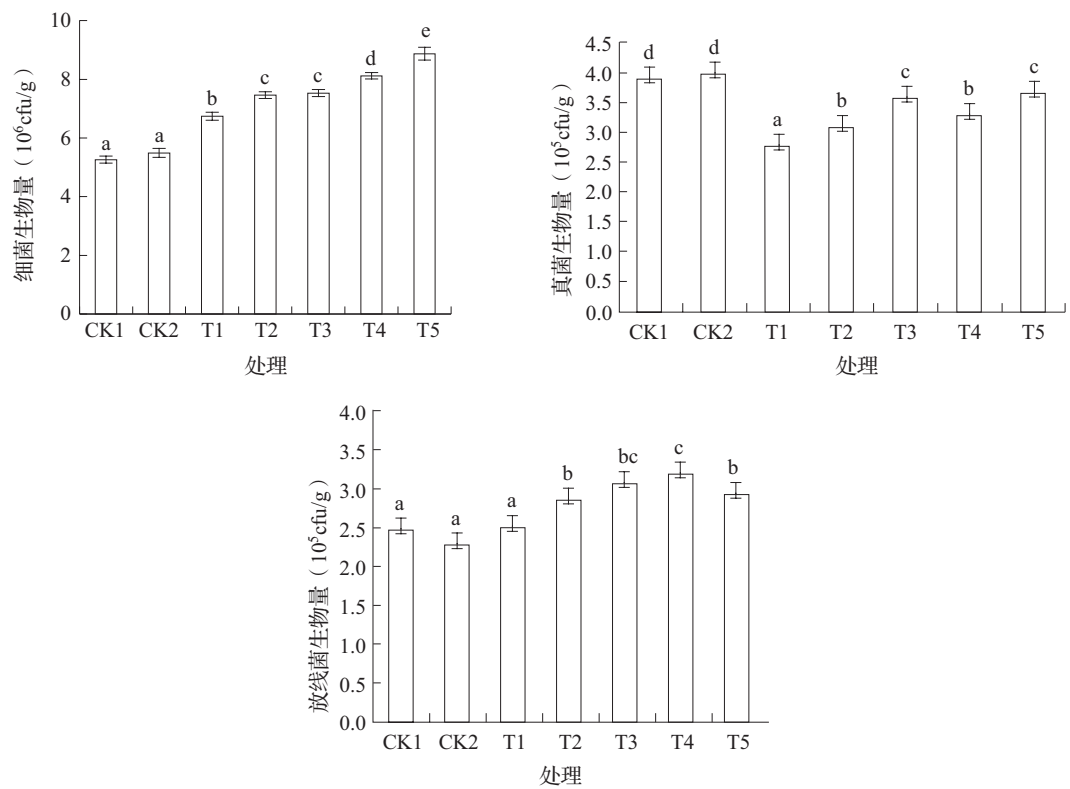


图2 不同处理对土壤微生物数量的影响

表5 土壤 pH 值和养分、酶活性和微生物数量的相关性分析

指标	pH 值	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	蔗糖酶活性	脲酶活性	过氧化氢酶活性	纤维素酶活性	细菌生物量	真菌生物量	放线菌生物量
pH 值	1											
有机质	0.82*	1										
碱解氮	0.90**	0.92**	1									
有效磷	0.95**	0.95**	0.96**	1								
速效钾	0.86*	0.96**	0.91**	0.97**	1							
蔗糖酶活性	0.91**	0.73	0.90**	0.89**	0.83*	1						
脲酶活性	0.90**	0.82*	0.90**	0.94**	0.91**	0.95**	1					
过氧化氢酶活性	0.91**	0.67	0.89*	0.85*	0.73	0.96**	0.89**	1				
纤维素酶活性	0.91**	0.95**	0.97**	0.99**	0.97**	0.89**	0.95**	0.84*	1			
细菌生物量	0.93**	0.96**	0.95*	0.99**	0.94**	0.84*	0.89**	0.81*	0.97**	1		
真菌生物量	-0.48	-0.16	-0.24	-0.31	-0.10	-0.26	-0.31	-0.43	-0.25	-0.36	1	
放线菌生物量	0.95**	0.78*	0.88**	0.92**	0.88**	0.96**	0.94**	0.92**	0.91**	0.86*	-0.29	1

注: * 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)。

2.8 主成分分析

对收获后 7 个处理土壤 pH 值和养分、酶活性和微生物数量的 12 个指标开展主成分分析,得到主成分的特征值、方差贡献率和累计方差贡献率,详见表 6,选取累计方差贡献率大于 90% 的主成分

分析,主成分 1 特征值 10.109,涵盖了 84.241% 的信息,主成分 2 特征值 1.078,涵盖了 8.984% 的信息,2 个主成分代表原始数据 93.225% 的信息,可以替代 7 个处理 12 个指标进行综合评价。

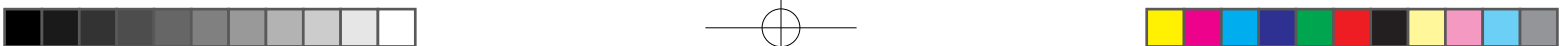


表 6 主成分特征值和方差贡献率

主成分	特征值	方差贡献率 (%)	累计方差贡献率 (%)
1	10.109	84.241	84.241
2	1.078	8.984	93.225

由表 7 各指标载荷值可知,主成分 2 主要由真菌生物量组成,主成分 1 由其余 pH 值等 11 个指标组成,通过函数 $U_i=A_i/\sqrt{\lambda_i}$ (U_i 代表主成分得分系数, A_i 代表因子载荷矩阵, λ_i 代表特征值) 可得各主成分表达式:

$$F1=0.30X_1+0.29X_2+0.30X_3+0.31X_4+0.30X_5+0.30X_6+0.30X_7+0.29X_8+0.31X_9+0.30X_{10}-0.11X_{11}+0.30X_{12}$$

$$F2=-0.18X_1+0.25X_2+0.090X_3+0.050X_4+0.27X_5-0.039X_6-0.006X_7-0.23X_8+0.12X_9+0.017X_{10}+0.87X_{11}-0.027X_{12}$$

$$\text{综合得分} = (0.84F1+0.090F2) / (0.84+0.090)$$

其中 X_1 、 X_2 、 X_3 ... X_{12} 分别代表 pH 值、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量、蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、纤维素酶活性、细菌生物量、真菌生物量和放线菌生物量标准化后的数据值。

表 7 土壤指标载荷值矩阵

指标	载荷值	
	主成分 1	主成分 2
pH 值	0.963	-0.187
有机质	0.908	0.258
碱解氮	0.969	0.09
有效磷	0.991	0.051
速效钾	0.942	0.278
蔗糖酶活性	0.938	-0.041
脲酶活性	0.962	-0.006
过氧化氢酶活性	0.907	-0.236
纤维素酶活性	0.983	0.119
细菌生物量	0.967	0.018
真菌生物量	-0.335	0.903
放线菌生物量	0.951	-0.028

通过主成分综合得分函数模型计算并排序(表 8),不同施肥处理综合得分和排序为 $T5>T4>T3>T2>T1>CK2>CK1$ 。

表 8 综合得分和排序

处理	F1	F1 排名	F2	F2 排名	综合得分	综合排名
CK1	-3.97	6	0.495	3	-3.54	7
CK2	-4.10	7	0.87	2	-3.362	6
T1	-1.32	5	-1.62	7	-1.35	5
T2	0.65	4	-1.05	6	-0.49	4
T3	2.38	3	0.091	4	2.16	3
T4	3.19	1	-0.094	5	2.87	2
T5	3.18	2	1.31	1	3.00	1

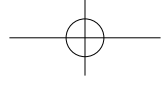
3 讨论

3.1 不同施肥处理对水稻产量和稻米品质的影响

微生物菌肥和生物炭具有互补的特性,微生物菌肥含有大量的有益微生物和有机质,可提高土壤养分和微生物的活性,而生物炭具有多孔结构和强吸附性,可以为微生物提供载体,同时生物炭本身含有大量的矿物元素和活性成分,能提高土壤有机质,为微生物提供养料,两者配施后可以进一步提高土壤酶活性,增加有益菌群的数量,促进土壤养分的转化,提高肥料利用率,从而达到提高产量、

改善品质的效果^[15-16]。

本研究显示,单增施微生物菌肥可显著提高水稻的有效穗数、每穗实粒数、穗长和产量,可见微生物菌肥主要通过影响有效穗数和每穗实粒数达到增产的效果,这与屈成等^[17]在生物菌肥与化肥配施对水稻生长特性及产量的影响的研究结果类似。微生物菌肥和生物炭配施效果更加明显,本试验结果表明,微生物菌肥配施不同用量的生物炭与单施微生物菌肥相比,能不同程度地提高水稻各经济性状,其中微生物菌肥配施生物炭 3000 kg/hm² 效果最佳,能显著增产 3.76%,与常规施肥相比,增产可达 12.59%,梁潇



等^[18]研究显示,与单施微生物菌肥或生物炭相比,两者以一定比例配施能显著提高平欧杂种榛的生长指标、产量,这也能印证本研究的结果。

在杨庆等^[19]的研究中发现,施用生物菌肥能显著提高稻米整精米率和胶稠度,降低直链淀粉含量,本研究结果显示单施用微生物菌肥与常规施肥相比,能显著提高稻米精米率、整精米率和胶稠度,显著降低直链淀粉含量,与前人研究结果一致。刘涛等^[20]在对水蜜桃的研究中发现,施用适量的生物炭和微生物菌肥可提高单果鲜重、果实甜度,而本研究也有类似结果,与单施微生物菌肥处理相比,微生物菌肥和生物炭配施处理的整精米率和胶稠度有显著增加,同时直链淀粉含量显著降低,配施中高用量生物炭可显著提高糙米率、精米率,降低垩白度,可见微生物菌肥配施一定量的生物炭能明显改善稻米外观、加工和食味品质,显著提高稻米品质,其中微生物菌肥配施生物炭 3000 kg/hm²的处理品质最高。

在研究中还发现,在微生物菌肥用量不变的前提下,产量和稻米品质随着生物炭施用量的增加出现先升后降的趋势。邱岭军等^[21]在烤烟种植中施加不同用量生物炭对产量和品质进行分析时得出,施用生物炭 3000 kg/hm² (中等用量) 时烤烟产量最高,烟叶品质也最好,张曼等^[22]在菌肥配施生物炭对设施西瓜生长的影响中发现,菌肥配施中量生物炭处理的设施西瓜产量最高,果实品质最佳,这与本试验得出的结果一致。但在石吕等^[23]的研究中显示,施用生物炭可明显提高水稻糙米率、精米率、整精米率和胶稠度,且随施用量的增加呈提高的趋势,垩白粒率和垩白度则与之相反,这与本研究结果并不完全一致,这可能与生物炭种类、环境和水稻品种有关。综上所述,水稻产量和稻米品质并非一定和生物炭用量呈正相关,在与微生物菌肥配施中要注意科学配比,以达到增产提质的目的,同时也减少成本投入。

利用隶属函数法进行综合评价,结果显示微生物菌肥配施生物炭 3000 kg/hm² 的处理评分最高,效果最好,其次为微生物菌肥配施生物炭 2250 kg/hm² 和微生物菌肥配施生物炭 3750 kg/hm² 的处理,两者评分极为接近。

3.2 不同施肥处理对土壤 pH 值和养分、酶活性和土壤微生物数量的影响分析

王涛等^[24]研究发现,在黄瓜连作土壤上施用

微生物菌肥,能显著提高土壤 pH 值及碱解氮、有效磷、有效钾、有机质含量。李影等^[25]研究发现,菌肥和生物炭配施提高了烟草生长前期和后期土壤有效磷含量,60% 有机菌肥配施 40% 生物炭对提高土壤有效磷和速效钾含量效果显著。本研究中,施用微生物菌肥显著提高土壤 pH 值和有机质,微生物菌肥和生物炭配施处理的土壤各养分含量比常规施肥均有显著提高,而和单施微生物菌肥处理相比,有效磷和速效钾含量显著增加,配施中高用量生物炭可显著增加 pH 值、有机质和碱解氮含量,进一步验证了前人的结果。

土壤酶活性是衡量土壤健康状况的重要指标,脲酶可以体现土壤氮的供应能力,蔗糖酶体现土壤熟化程度,过氧化氢酶的高低可以反映土壤对生物毒害的自净能力^[26],纤维素酶体现土壤碳库活性与含量的变更状态^[27]。本研究结果显示,增施微生物菌肥能显著增加土壤酶的活性,微生物菌肥配施生物炭处理蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、纤维素酶活性比单施微生物菌肥处理分别显著提高 20.09% ~ 40.25%、19.15% ~ 46.81%、1.21% ~ 8.06%,中高用量的生物炭处理脲酶活性也显著提高 18.92% ~ 23.65%。朱金峰等^[28]研究表明,施用微生物菌剂显著提高了土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性,赵晓军等^[29]也发现,添加生物炭和微生物菌剂能显著提高了土壤酶活性,其中以生物炭微生物菌剂配施提高幅度最大,这与本研究结果一致。本研究中还显示脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性随着生物炭施用量的增加先升高后降低,但周震峰等^[30]研究发现,随着生物炭用量施用量的增加土壤酶活性也随之提高,高水平用量有显著的促进效果,这与本研究结果不同。根据相关研究发现,生物炭在一定施用范围内能提高土壤酶的活性,但过量生物炭的加入会通过吸附酶分子而对酶促反应结合位点形成保护,从而阻止酶促反应的进行,降低土壤酶的活性^[31-32],之所以出现与本研究结果不同的情况,分析是由于其试验土壤酶活性较低,而生物炭施用量未达到临界值。

土壤微生物是土壤有效养分活动中心,其数量的变化能反映土壤环境的变化^[33]。本研究发现,施用微生物菌肥可显著增加土壤细菌生物量,显著减少真菌生物量,微生物菌肥配施生物炭各处理比单施微生物菌肥处理的细菌生物量、真菌生物量和放线菌生物量分别显著提高 10.68% ~ 31.60%、



11.30% ~ 32.60% 和 13.94% ~ 27.09%。张德楠等^[34]研究发现施用微生物菌肥后,细菌、放线菌和固氮菌的数量显著增加,真菌数量明显降低。凌天孝等^[35]研究表明,施用生物炭能够提升土壤细菌、放线菌含量和真菌数量,这与本研究结果相符合。

通过主成分综合得分排序,最高的为增施微生物菌肥 1500 kg/hm²+ 生物炭 3750 kg/hm²,其次为增施微生物菌肥 1500 kg/hm²+ 生物炭 3000 kg/hm²。

4 结论

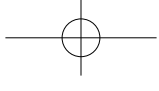
在常规施肥的基础上,单施微生物菌肥、微生物菌肥配施生物炭均能显著提高水稻经济性状、产量和稻米品质,提升土壤有效养分含量,提高土壤酶活性和微生物数量。通过主成分分析综合得分,微生物菌肥配施生物炭 3750 kg/hm² 处理得分最高,但利用隶属函数法对经济性状和品质进行综合评价,显示微生物菌肥配施生物炭 3000 kg/hm² 的处理评分最高,考虑到生产经济价值,推荐常规施肥 + 微生物菌肥 1500 kg/hm²+ 生物炭 3000 kg/hm² 的施肥模式应用推广于当地生产中。

参考文献:

- [1] 孔祥斌. 耕地“非粮化”问题、成因及对策[J]. 中国土地, 2020 (11): 17-19.
- [2] 顾生芳. 复合微生物菌肥在番茄上的肥效试验研究[J]. 农业科技与信息, 2018, 15 (8): 10-12.
- [3] Barbosa A A T, Mantovani H C, Jain S. Bacteriocins from lactic acid bacteria and their potential in the preservation of fruit products [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37 (7): 852-864.
- [4] 赵冬妍, 梅国红, 王成科, 等. 碳基复合微生物菌肥在水稻生产上的应用效果初探[J]. 上海农业科技, 2023 (6): 40-41.
- [5] Morais M C, Mucha A, Ferreira H, et al. Comparative study of plant growth-promoting bacteria on the physiology, growth and fruit quality of strawberry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99 (12): 5342-5349.
- [6] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展[J]. 生态科学, 2018, 37 (1): 192-199.
- [7] Yu H W, Zou W X, Chen J J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 8-21.
- [8] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. Soil Use and Management, 2011, 27 (2): 205-212.
- [9] Zhu Q, Kong L J, Shan Y Z, et al. Effect of biochar on grain

yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18 (10): 2242-2254.

- [10] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41 (6): 1301-1310.
- [11] 茹朝, 郁继华, 武玥, 等. 化肥减量配施生物有机肥对露地大白菜产量及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34 (8): 1626-1637.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-323.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [15] 白雪, 李小英, 李俊龙, 等. 生物炭与菌肥配施对元宝枫育苗基质性质及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48 (9): 148-154.
- [16] 钟明涛, 李维弟, 朱永琪, 等. 生物炭和菌肥对土壤镉形态和棉花镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53 (5): 1172-1181.
- [17] 屈成, 刘芳, 傅爱斌, 等. 生物菌肥与化肥配施对水稻生长特性及产量的影响[J]. 杂交水稻, 2023, 38 (4): 134-139.
- [18] 梁潇, 高利, 吴芳, 等. 生物炭和微生物菌肥配施对平欧杂种榛生长发育和产量的影响[J]. 现代园艺, 2021, 44 (14): 9-11.
- [19] 杨庆, 杨晶, 吕彬, 等. 富农生物菌肥对水稻生长、产量及品质的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20 (5): 72-74.
- [20] 刘涛, 张涛, 谢乐添, 等. 生物炭和微生物菌肥对水蜜桃产量和品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62 (2): 284-289.
- [21] 邱岭军, 张翔, 李亮, 等. 生物炭施用量对土壤特性和烟叶产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (18): 153-156.
- [22] 张曼, 郝科星, 张焕, 等. 菌肥与生物炭配施对设施西瓜生长及土壤理化性质的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36 (5): 72-77.
- [23] 石吕, 薛亚光, 韩笑, 等. 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (23): 222-228.
- [24] 王涛, 辛世杰, 乔卫花, 等. 几种微生物菌肥对连作黄瓜生长及土壤理化性状的影响[J]. 中国蔬菜, 2011 (18): 52-57.
- [25] 李影, 李斌, 柳东阳, 等. 生物炭配施菌肥对植烟土壤养分和可溶性有机碳氮光谱特征的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33 (6): 227-234.
- [26] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (2): 316-321.
- [27] 陈强龙. 秸秆还田与肥料配施对土壤氧化还原酶活性影响的



- 研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2009.
- [28] 朱金峰, 王小东, 郭传滨, 等. 施用微生物菌剂对土壤关键酶活性和烤烟根系生长的影响 [J]. 江西农业学报, 2015, 27 (9): 31-35.
- [29] 赵晓军, 李丽, 张璇, 等. 生物炭与微生物菌剂配施对土壤生物和化学特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46 (25): 109-112.
- [30] 周震峰, 王建超, 饶潇潇, 等. 添加生物炭对土壤酶活性的影响 [J]. 江西农业学报, 2015, 27 (6): 110-112.
- [31] Czimczik C I, Masiello C A. Controls on black carbon storage in soils [J]. Global Biogeochemistry Cycles, 2007, 21 (3): 113-120.
- [32] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology [M]. London, UK: Earthscan Ltd, 2009.
- [33] 李亮, 包耀贤, 廖超英, 等. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤微生物及酶活性研究 [J]. 西北植物学报, 2010, 30 (5): 987-994.
- [34] 张德楠, 张燕钊, 滕秋梅, 等. 化肥减量配施微生物菌肥对圣女果产量、品质及土壤肥力的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (10): 36-47.
- [35] 凌天孝, 于晓娜, 李志鹏, 等. 生物炭与化肥配施对土壤特性及烤烟品质和经济性状的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (6): 1425-1432.

The effect of combined application of microbial fertilizer and biochar on yield, quality of rice, and soil physicochemical properties in non-grain reclaimed rice areas

HU Tie-jun¹, SI Lin-lin^{2*} (1. Yuyao Agricultural Technology Extension Service Station, Yuyao Zhejiang 315400; 2. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou Zhejiang 310000)

Abstract: In order to determine the optimal combination ratio of microbial fertilizer and biochar in reclaimed rice areas, no fertilization and conventional fertilization were used as controls, on the basis of conventional fertilization, a single application of microbial fertilizer (1500 kg/hm²) and four different amounts of biochar (1500, 2250, 3000, 3750 kg/hm²) were applied with microbial fertilizer. The effects of different treatments on rice economic traits, yield, rice quality, soil pH value and nutrients, soil enzyme activity and microbial quantity were compared. The results showed that microbial fertilizer combined with biochar significantly improved rice economic traits, yield and rice quality, and showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of biochar dosage. A comprehensive evaluation of economic traits and quality was conducted using the membership function method, and it was found that the treatment of microbial fertilizer combined with biochar of 3000 kg/hm² had the highest score. Compared with conventional fertilization, it significantly increased yield by 12.59%, increased the brown rice rate, milled rice rate, whole milled rice rate and gel consistency significantly by 0.82%, 3.84%, 5.24% and 6.23%, respectively, while decreased the chalkiness significantly by 25.58%. At the same time, the combination of the two fertilizers significantly increased the pH value and organic matter, alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium contents by 0.20-0.31, 13.18%-33.48%, 5.97%-15.73%, 17.81%-39.83% and 6.19%-9.48%, respectively, compared to conventional fertilization. The activities of sucrase, urease, catalase and cellulase were significantly increased by 32.64%-54.91%, 14.07%-35.56%, 87.93%-137.93% and 5.30%-12.42%, respectively. The biomass of bacteria and actinomycetes was significantly increased by 35.88%-61.57% and 25.44%-39.91%, respectively. Fungal biomass significantly decreased by 7.34%-22.28%. According to the comprehensive score of principal component analysis, the treatment of microbial fertilizer combined with biochar at 3750 kg/hm² had the highest score. However, for economic considerations, it was recommended to apply the fertilization model of conventional fertilization and microbial fertilizer at 1500 kg/hm² with biochar at 3000 kg/hm² in local production.

Key words: rice; reclaimed rice areas; microbial fertilizer; biochar