

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22397

冬种绿肥和有机无机肥配施对农村宅基地复垦土壤养分、酶活性及水稻产量的影响

居 静¹, 张 欢¹, 顾 强¹, 王婉露¹, 毛 伟², 杨洪建³, 赵海涛^{1*}

(1. 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 扬州大学, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州耕地质量保护站, 江苏 扬州 225101; 3. 江苏省农业技术推广总站, 江苏 南京 210036)

摘 要: 为了探明冬种绿肥和有机无机肥配施对农村宅基地复垦土壤养分、酶活性及水稻产量的影响, 通过 5 组不同处理的大田试验开展研究, 5 个处理分别为: 冬种小麦 + 水稻施用 100% 化肥 (对照 1, CK1); 冬种绿肥 + 水稻施用 100% 化肥 (对照 2, CK2); 冬种绿肥 + 水稻施用 40% 鸡粪肥 + 60% 化肥 (T1); 冬种绿肥 + 水稻施用 40% 蚯蚓粪肥 + 60% 化肥 (T2); 冬种绿肥 + 水稻施用 40% 菜籽饼肥 + 60% 化肥 (T3)。结果表明: (1) 与 CK1 相比, 冬种绿肥 + 40% 有机肥 + 60% 化肥处理均提高了水稻产量, 增产幅度为 15.9% ~ 37.4% (2019 年)、17.2% ~ 29.6% (2020 年); T2 和 T3 处理的增产效果优于 T1 处理。(2) 与 CK1 相比, 冬种绿肥 + 40% 有机肥 + 60% 化肥处理均提高了土壤总碳、全氮、碱解氮、铵态氮 + 硝态氮 ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)、有效磷、速效钾的含量, 提高幅度分别为 4.4% ~ 13.2%、18.9% ~ 24.5%、23.2% ~ 37.6%、38.8% ~ 83.2%、25.7% ~ 59.8%、1.5% ~ 9.8%; T3 处理更有利于提高土壤总碳、全氮、碱解氮和 $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ 含量, T2 处理更有利于提高土壤有效磷和速效钾含量。(3) 与 CK1 相比, 冬种绿肥 + 40% 有机肥 + 60% 化肥处理提高了土壤蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性, 同时维持或提高了脲酶活性。T3 处理更有利于提高土壤蔗糖酶活性, T2 处理更有利于提高土壤脲酶和碱性磷酸酶活性。(4) 水稻产量与土壤总碳、全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ 、有效磷含量及土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性显著正相关 ($P < 0.05$), 且与土壤全氮、碱解氮含量及土壤蔗糖酶、土壤过氧化氢酶活性的相关性更好。以上结果表明, 在农村宅基地复垦土壤上, 通过冬种绿肥结合水稻上施用 40% 有机肥 + 60% 化肥能迅速培肥土壤从而达到提高水稻产量的效果, 且施用蚯蚓粪肥和菜籽饼肥的效果优于鸡粪肥。

关键词: 绿肥; 有机肥; 农村宅基地复垦土; 土壤养分; 土壤酶活性; 水稻产量

我国是一个以农业为主但耕地资源不足的国家, 人地矛盾突出^[1]。随着我国城镇化进程加快, 导致大量农村宅基地被闲置废弃。全国范围内村庄宅基地空心化的典型调查数据表明, 村庄内部废弃闲置宅基地已占到宅基地总量的 10.2%^[2]。如果能对已有的闲置和废弃宅基地进行充分利用, 将是保护土地资源, 缓解人地矛盾的重要举措。但这些宅基地通常存在土壤质量较差的问题^[3], 如何修复和改良这些土壤显得尤为重要。目前关于农村宅基地复垦的研究主要围绕景观格局和生态效应^[4]、工程技术^[5]、复垦策略研究^[6]等, 对如何进行土壤修复

利用研究较少, 本研究在此背景下开展。

已有研究表明, 冬季绿肥翻压后可以提高土壤养分和增加有机碳库^[7-9]。其中, 以紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 为代表的豆科二年生草本植物, 生长迅速、适应性强, 可为后茬作物生长提供丰富的营养物质^[10], 是我国目前推广的粮-绿轮作的主要绿肥类型之一。有机肥富含有机、无机养分, 各种生理活性物质, 有益微生物菌群, 能够改良土壤结构、提高土壤养分^[11], 另外当其与化肥配施, 可以同时兼顾有机肥养分持久释放和单质化肥的速效性的优点, 有利于改善土壤理化特性和生物活性。畜禽粪等有机肥主要含有含氮化合物, 易矿化为氨和硝酸盐^[12-13], 因此是一种比较理想的培肥土壤的有机肥料, 其中鸡粪是利用率较高的畜禽粪便, 鸡粪施用可以增加土壤碳库等^[14], 对作物生长有促进作用。蚯蚓粪富含大量的有机质、氮、磷和钾^[15], 可提高土壤磷酸酶、蛋白酶、脲酶和蔗糖酶等的活性, 增

收稿日期: 2022-06-29; 录用日期: 2022-07-31

基金项目: 江苏省作物遗传生理重点实验室开放课题 (YCSL202105); 江苏省现代农业 (水稻) 产业体系项目 (JAIS [2022] 358)。

作者简介: 居静 (1976-), 副教授, 博士, 从事肥料利用与耕地质量提升研究。E-mail: jujing@yzu.edu.cn。

通讯作者: 赵海涛, E-mail: htzhao@yzu.edu.cn。

强土壤供肥性能^[16], 改善土壤结构^[17]和微生物种群^[18], 提高作物产量^[19]。菜籽饼肥有机质含量高, 且含氮、磷、钾元素较多, 能提高作物产量和品质, 同时起到改良土壤的作用^[20-22]。

因此, 冬种绿肥结合有机无机肥配施被认为是快速培肥土壤的有效措施之一。纵观已有的短期或长期绿肥或有机肥试验, 往往都集中于土壤肥力较高的土壤上, 对土壤肥力较低农村宅基地复垦土壤的改良研究鲜有报道。另外, 土壤酶对土壤肥力变化反应灵敏, 是表征土壤肥力和土壤质量等方面的重要指标之一^[23], 但目前对农村宅基地复垦土壤碳、氮、磷转化等的相关酶活性缺乏研究。为此, 我们设置冬种绿肥+40%有机肥+60%化肥处理, 研究其投入对农村宅基地复垦土壤培肥效果及水稻产量的影响, 以期为农村宅基地复垦土壤的利用及水稻生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于2019—2020年在江苏省扬州市邗江区公道镇谷营村(119° 19' 10" E, 32° 34' 13" N)进行, 该地区海拔高度12 m, 平均气温15℃, 年平均降水量1063.2 mm, 无霜期223 d, 光照充足。试验田2012年前为农村宅基地, 2012年村庄拆迁, 就近客土法进行宅基地工程复垦, 2013年该复垦土地闲置1年, 2014—2018年进行水稻-小麦种植, 2019—2020年开始进行冬种绿肥结合水稻有机无机肥配施研究。试验开始前土壤有机质含量11.8 g·kg⁻¹、全氮含量0.4 g·kg⁻¹、有效磷含量11.9 g·kg⁻¹、速效钾含量191 g·kg⁻¹。

1.2 供试材料

以南粳3908为供试水稻品种, 该水稻品种适宜在江苏省苏中及宁镇扬丘陵地区种植。供试冬种绿肥品种: 紫云英(*Astragalus sinicus* L.)。供试有机肥: 鸡粪肥(C 16.6%、N 1.6%、P₂O₅ 1.2%、K₂O 0.7%)、蚯蚓粪肥(C 14.5%、N 2.0%、P₂O₅ 1.7%、K₂O 1.0%)、菜籽饼肥(C 38.1%、N 4.2%、P₂O₅ 2.3%、K₂O 1.6%)。供试化肥: 尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、氯化钾(K₂O 60%)、三元复合肥(26-10-15)、三元复合肥(15-15-15)、二元复合肥(30-0-5)。

1.3 试验设计

采用大田小区试验, 随机区组设计, 重复3

次, 设置5个处理: (1) 冬种小麦+水稻施用100%化肥(对照1, CK1); (2) 冬种绿肥+水稻施用100%化肥(对照2, CK2); (3) 冬种绿肥+水稻施用40%鸡粪肥+60%化肥(T1); (4) 冬种绿肥+水稻施用40%蚯蚓粪肥+60%化肥(T2); (5) 冬种绿肥+水稻施用40%菜籽饼肥+60%化肥(T3)。紫云英播种量为74 kg·hm⁻², 在翌年4月下旬直接进行翻耕还田。各处理水稻上氮用量均相等, 为300 kg·hm⁻², 其中有机肥化肥配施处理下有机氮:化肥氮为4:6, 分别为120、180 kg·hm⁻², 具体肥料用量见表1。有机肥一次性基施。氮肥分基肥、蘖肥、穗肥3次施入, 基肥:穗肥为6:4, 基肥:蘖肥为6:4。磷肥一次性基施; 钾肥分基、穗肥两次施入, 基肥:穗肥为2:1。水稻于2019年6月15日及2020年6月20日进行秧苗移栽, 秧龄为3.5~4.0叶, 栽插行株距为30 cm×12.5 cm, 每公顷栽26.7万穴。小区面积36 m², 每个小区用塑料隔板进行隔筑防止串肥。考虑到边际效应的影响, 处理周围设置保护区, 田间管理参照当地管理模式。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 水稻样品采集与测定

成熟期各小区选取28穴水稻植株统计每穴平均穗数, 并选取3穴代表性水稻植株带回实验室, 测定每穗粒数、结实率、千粒重, 计算水稻理论产量。

1.4.2 土壤样品采集与测定

2020年水稻成熟期收割后, 每个小区采用对角线五点土壤采样法, 采取0~20 cm土层鲜土样, 制成一个混合样, 去除杂质, 过2 mm尼龙筛, 送往苏州科铭生物技术有限公司用于土壤酶活性的测定。土壤蔗糖酶: 蔗糖酶催化蔗糖降解产生还原糖, 进一步与3, 5-二硝基水杨酸反应, 生成棕红色氨基化合物, 在510 nm有特征光吸收, 在一定范围内510 nm光吸收增加速率与蔗糖酶活性成正比。土壤脲酶: 利用靛酚蓝比色法测定脲酶水解尿素产生的铵态氮。土壤过氧化氢酶: H₂O₂在240 nm下有特征吸收峰, 通过测定与土壤反应后溶液在此波长下吸光度的变化, 即可反映过氧化氢酶活性的高低。土壤碱性磷酸酶: 碱性环境中, 碱性磷酸酶催化磷酸苯二钠水解生成苯酚和磷酸氢二钠, 通过测定酚的生成量即可计算出碱性磷酸酶活性。具体操作参照酶试剂盒说明书进行。

表1 不同施肥处理设计

(kg · hm⁻²)

处理	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		总量		
	有机肥	化肥	有机肥	化肥	有机肥	化肥	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK1	0	300	0	75	0	150	300	75	150
CK2	0	300	0	75	0	150	300	75	150
T1	120	180	90	0	53	97	300	90	150
T2	120	180	102	0	60	90	300	102	150
T3	120	180	66	9	46	104	300	75	150

另外, 每小区再采集 0 ~ 20 cm 土层土样, 制成一个混合样, 去除杂质, 装入塑封袋中带回室内进行风干处理、磨碎, 分别过 0.85 与 0.15 mm 筛子用于测定土壤养分含量。土壤碳及氮采用德国 Vario EL cube 元素分析仪进行测定。土壤碱解氮、铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾等具体测定方法参见鲍士旦《土壤农化分析》^[24]。

1.5 数据分析方法

采用 Excel 2016 进行图、表制作。用 SPSS 23.0 进行方差分析和显著性比较, 处理间的多重比较 (统计显著水平为 $P < 0.05$) 采用 Duncan 法。采用 Origin 2021 进行相关性和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 冬种绿肥和有机无机肥配施对水稻产量的影响

由图 1 可知, 与 CK1 相比, 冬种绿肥处理均增加或显著增加了 ($P < 0.05$) 水稻产量, 增产幅度分别为 11.1% ~ 37.4% (2019 年)、4.0% ~ 29.6% (2020 年); 与 CK2 相比, 冬种绿肥 +40% 有机肥 +60% 化肥增加或显著增加了 ($P < 0.05$) 水稻产量, 增产幅度为 4.4% ~ 23.7% (2019 年)、12.7% ~ 24.6% (2020 年)。3 种有机肥种类中, T2 (蚯蚓粪) 及 T3 (菜籽饼肥) 处理的增产效果优于 T1 (鸡粪)。

2.2 冬种绿肥和有机无机肥配施对土壤养分的影响

由表 2 可知, 经过 2 年处理后, 与 CK1 相比, 冬种绿肥处理均提高了土壤总碳、全氮、碱解氮、铵态氮 + 硝态氮 ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)、有效磷、速效钾的含量, 提高幅度分别为 4.4% ~ 13.2%、7.5% ~ 24.5%、4.3% ~ 37.6%、1.4% ~ 83.2%、21.0% ~ 59.8%、1.5% ~ 9.8%; 与 CK2 相比, 冬种绿肥 +40% 有机肥 +60% 化肥提高了土壤全

氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ 、有效磷的含量, 提高幅度分别为 10.5% ~ 15.8%、18.1% ~ 31.9%、37.0% ~ 80.7%、3.9% ~ 32.1%, 维持或提高了土壤总碳和速效钾的含量。3 种有机肥种类中, T3 处理更有利于提高土壤总碳、全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ 含量, T2 处理更有利于提高土壤有效磷和速效钾含量。

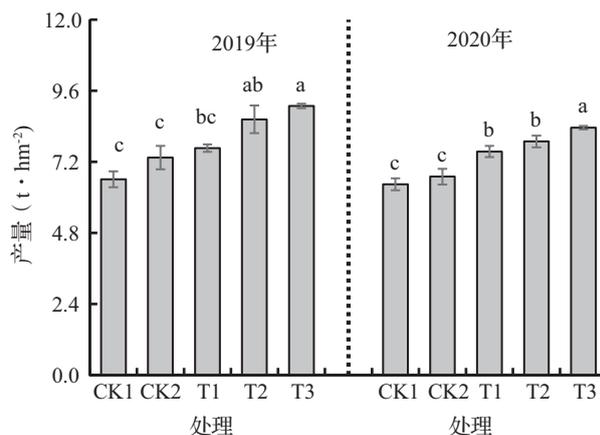


图1 不同处理对水稻产量的影响

注: 柱形图上的不同字母分别表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 冬种绿肥和有机无机肥配施对土壤酶活性的影响

由表 3 可知, 与 CK1 相比, 冬种绿肥均显著增加了 ($P < 0.05$) 土壤蔗糖酶活性; 与 CK2 处理相比, 冬种绿肥 +40% 有机肥 +60% 化肥显著提高了 ($P < 0.05$) 土壤蔗糖酶活性; T3 处理土壤蔗糖酶活性显著 ($P < 0.05$) 高于 T1 和 T2 处理。冬种绿肥下, 仅有 T2 处理下脲酶活性显著高于 CK1, 其余处理间差异不显著。与 CK1 相比, CK2 处理显著降低了土壤过氧化氢酶活性, 但冬种绿肥 +40% 有机肥 +60% 化肥显著提高了 ($P < 0.05$) 土壤过氧

化氢酶活性, 3种有机肥间无显著差异 ($P>0.05$)。CK1与CK2处理间土壤碱性磷酸酶活性无显著差异; 但与CK1和CK2处理相比, 冬种绿肥+40%

有机肥+60%化肥提高或显著 ($P<0.05$) 提高了土壤碱性磷酸酶活性; T2处理碱性磷酸酶活性显著高于T1与T3处理。

表2 不同处理对水稻成熟期土壤养分的影响

处理	总碳 ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮 ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮 ($mg \cdot kg^{-1}$)	铵态氮+硝态氮 ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷 ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾 ($mg \cdot kg^{-1}$)
CK1	6.80 ± 0.04d	0.53 ± 0.05b	52.61 ± 0.37c	28.08 ± 1.39c	11.68 ± 1.24b	190.58 ± 3.57b
CK2	7.18 ± 0.01c	0.57 ± 0.04b	54.88 ± 1.40c	28.46 ± 2.09c	14.13 ± 1.24b	196.08 ± 3.80b
T1	7.58 ± 0.01b	0.63 ± 0.03a	64.83 ± 5.50b	40.19 ± 1.50b	16.16 ± 3.00a	193.52 ± 3.98b
T2	7.10 ± 0.07c	0.64 ± 0.03a	68.80 ± 2.91ab	38.98 ± 1.09b	18.67 ± 2.95a	209.34 ± 3.55a
T3	7.70 ± 0.04a	0.66 ± 0.03a	72.37 ± 3.65a	51.44 ± 2.12a	14.68 ± 2.93ab	195.42 ± 4.12b

注: 数值后同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

表3 不同处理对水稻成熟期土壤酶活性的影响

处理	蔗糖酶 ($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	脲酶 ($\mu g \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	过氧化氢酶 ($\mu mol \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	碱性磷酸酶 ($\mu mol \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)
CK1	43.71 ± 0.18d	630.74 ± 7.08b	57.33 ± 0.12b	5.76 ± 0.04c
CK2	55.46 ± 0.44c	619.92 ± 18.18b	56.41 ± 0.04c	5.66 ± 0.05c
T1	57.14 ± 0.68b	630.22 ± 16.32b	59.08 ± 0.28a	6.35 ± 0.09b
T2	58.44 ± 0.04b	754.86 ± 26.78a	59.31 ± 0.04a	7.43 ± 0.16a
T3	59.82 ± 0.51a	597.22 ± 1.51b	59.19 ± 0.02a	5.97 ± 0.10c

2.4 水稻产量、土壤养分及酶活性间相关分析

由图2可知, 水稻产量与土壤总碳、全氮、碱解氮、 $NH_4^+ + NO_3^-$ 、有效磷含量及土壤蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性显著正相关 ($P<0.05$), 与速效钾含量、脲酶活性无显著相关性 ($P>0.05$)。土壤蔗糖酶活性与土壤总碳、全氮、碱解氮、 $NH_4^+ + NO_3^-$ 、有效磷、速效钾含量显著正相关 ($P<0.05$)。土壤脲酶活性只与土壤中速效钾含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 与其余土壤养分含量均无显著相关性 ($P>0.05$)。土壤过氧化氢酶活性与土壤总碳、全氮、碱解氮、 $NH_4^+ + NO_3^-$ 含量显著正相关 ($P<0.05$), 与土壤有效磷、速效钾含量无显著相关性 ($P>0.05$)。土壤碱性磷酸酶活性与土壤全氮、碱解氮、有效磷及速效钾含量

显著正相关 ($P<0.05$), 但与土壤总碳、 $NH_4^+ + NO_3^-$ 含量无显著相关性 ($P>0.05$)。

由图3可知, 第一主成分和第二主成分的方差贡献率分别为58.1%和22.7%, 两者总和达80.8%, 可用于反映系统的变异信息。T1、T2和T3处理下水稻产量、土壤养分含量及酶活性均与CK1存在较大差异, CK1与CK2处理间差异不大。3种有机肥处理下, T2处理更有利于提高土壤有效磷、速效钾含量及脲酶、碱性磷酸酶活性; T3处理更有利于提高水稻产量及土壤总碳、全氮、速效氮含量和土壤蔗糖酶活性。产量与土壤全氮、碱解氮、 $NH_4^+ + NO_3^-$ 含量及土壤蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性相关性要高于其他土壤养分及酶活性。

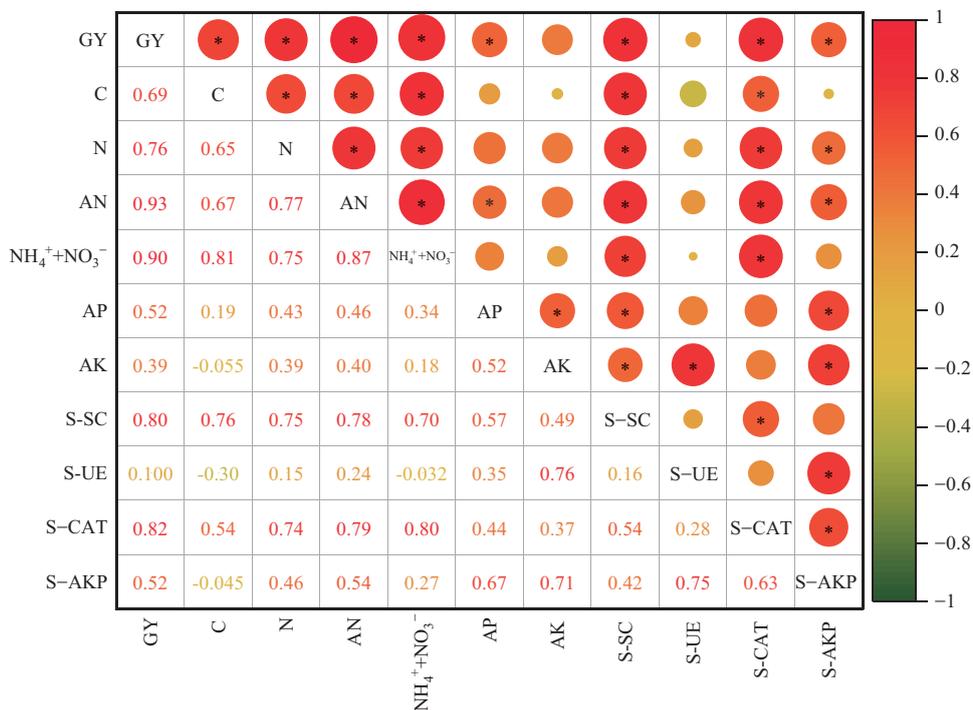


图2 产量、土壤养分、酶活性相关性分析

注: GY: 产量; C: 总碳; N: 全氮; AN: 碱解氮; NH₄⁺+NO₃⁻: 铵态氮 + 硝态氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾; S-SC: 土壤蔗糖酶; S-UE: 土壤脲酶; S-CAT: 土壤过氧化氢酶; S-AKP: 土壤碱性磷酸酶。下同。* 表示 P<0.05。

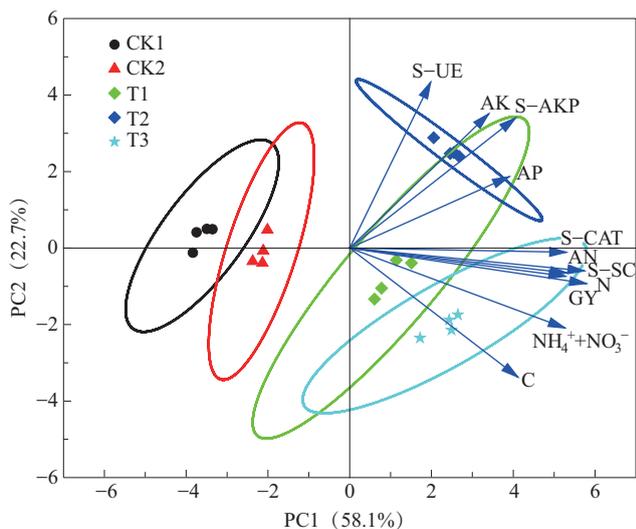


图3 水稻产量、土壤养分、土壤酶活性主成分分析

3 讨论

大量研究表明, 冬种绿肥压青还田能改变土壤理化性质和生物学性状, 提高作物产量^[25-26]; 长期使用有机无机肥配施可以提高土壤肥力及作物产量^[27-29], 但在农村废弃宅基地复垦土壤上将冬种绿肥结合水稻种植上有机无机肥配施目前研究甚

少。本研究结果表明, 针对农村宅基地复垦土壤改良, 从土壤养分含量分析发现, 与冬种小麦 + 水稻施用 100% 化肥相比, 冬种绿肥处理均提高了土壤总碳、全氮、碱解氮、NH₄⁺+NO₃⁻、有效磷、速效钾的含量; 与冬种绿肥 + 水稻施用 100% 化肥处理相比, 冬种绿肥 + 水稻施用 40% 有机肥 + 60% 化肥更能提高土壤全氮、碱解氮、NH₄⁺+NO₃⁻、有效磷的含量, 维持或提高土壤总碳和速效钾的含量 (表 2)。其主要原因可能是绿肥具有较强的固氮效应, 对提高土壤氮素含量有明显效果, 另外, 绿肥本身碳、氮、磷、钾含量较高, 将绿肥施入土壤其矿化后会释放出大量的碳、氮、磷、钾元素, 从而增加土壤中这些养分的含量^[9, 30-31]。有机无机肥配施能提高土壤有机碳库^[32]、使供氮缓慢而持久^[33]、增加土壤全磷、有效磷、速效钾含量^[34], 因此, 绿肥结合有机无机肥配施能迅速提高土壤养分含量。通过分析土壤酶活性发现, 与冬种小麦 + 水稻施用 100% 化肥处理相比, 冬种绿肥 + 水稻施用 40% 有机肥 + 60% 化肥更有利于提高土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性 (表 3)。其原因可能是, 绿肥在生长过程和翻压后均能向土壤中释放酶, 同时绿肥含有丰富的碳、氮源, 能为土壤微生物

物提供能源与养分,从而引起来自土壤微生物的土壤酶活性发生改变^[35-36];当冬种绿肥与有机肥化肥配施,也可以提高土壤微生物量,进而提高土壤酶活性^[37]。进一步分析土壤养分、酶活性的相关性发现,土壤蔗糖酶活性与土壤总碳、全氮及速效性氮、磷、钾含量显著正相关($P<0.05$);土壤过氧化氢酶活性与土壤总碳、全氮及速效性氮含量显著正相关($P<0.05$);土壤碱性磷酸酶活性与土壤全氮、速效性氮、磷、钾含量显著正相关($P<0.05$)(图2)。土壤酶活性变化可以反映土壤养分转化的动态过程,表示土壤肥力水平,本研究结果表明,冬种绿肥+水稻施用40%有机肥+60%化肥处理能够提升土壤酶活性,在促进土壤养分转化上起到了重要作用。

通过分析水稻产量发现,与冬种小麦+水稻施用100%化肥施用相比,冬种绿肥处理均提高了水稻产量,且冬种绿肥+水稻施用40%有机肥+60%化肥更有利于提高水稻产量(图1)。通过分析水稻产量、土壤养分、酶活性相关性发现,水稻产量与土壤总碳、全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ 含量及土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性显著正相关($P<0.05$),尤其与土壤全氮、碱解氮含量及土壤蔗糖酶、过氧化氢酶活性相关性更好(图2、3)。因此,冬种绿肥+水稻施用40%有机肥+60%化肥水稻产量较高,可能与该处理提高了土壤蔗糖酶及过氧化氢酶活性,从而促进了土壤养分的转化,提高了水稻产量有关。

不同类型有机肥由于其组成成分不同,对作物的生长影响也不一样。本研究结果表明,菜籽饼肥和蚯蚓粪肥增产效果优于鸡粪肥(图1)。究其原因,可能菜籽肥中富含蛋白质、氨基酸、磷、钾,在土壤中易被分解释放出速效养分^[20, 38]、吸附性能好,有利于提高土壤保肥性能^[22]、易分解为有益于促进微生物繁殖并增强微生物活性的物质,从而能够产生大量土壤酶^[39],进而提高了水稻的产量;蚯蚓粪具有较高的肥力,还含有腐殖酸、多种氨基酸和微量元素^[15-16],可以改良土壤结构等^[17],从而提高水稻的产量。

4 结论

冬种绿肥+水稻施用40%有机肥+60%化肥处理下土壤酶活性、养分含量及水稻产量高于冬种小麦+水稻100%化肥和冬种绿肥+水稻100%化肥;蚯蚓粪处理更有利于提高土壤有效磷、速效钾

含量及脲酶、碱性磷酸酶活性;菜籽饼肥处理更有利于提高土壤总碳、全氮、速效氮含量及土壤蔗糖酶活性。因此,在农村宅基地复垦土壤上,采用冬种绿肥+水稻施用40%有机肥+60%化肥有利于提升土壤肥力及水稻增产,且以蚯蚓粪肥和菜籽饼肥效果优于鸡粪。粮食高产高效和土壤质量提升也受土壤微生物活动的影响,本研究下一步将着重研究冬种绿肥+有机无机肥配施对土壤微生物的影响。

参考文献:

- [1] Zhou Y, Li X H, Liu Y S. Rural land system reforms in China: history, issues, measures and prospects [J]. Land Use Policy, 2020, 91: 104330.
- [2] 宋伟, 陈百明, 张英. 中国村庄宅基地空心化评价及其影响因素 [J]. 地理研究, 2013, 32 (1): 20-28.
- [3] 赖红松. 农村宅基地复耕存在的问题与对策——以温州市为例 [J]. 国土资源科技管理, 2008, 25 (2): 121-123.
- [4] 罗友进, 余端, 韩国辉, 等. 西南丘陵山区农村宅基地复垦景观格局和生态效应研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32 (5): 429-435.
- [5] 胡斐南, 魏朝富, 殷帅, 等. 西南丘陵山区农村废弃宅基地复垦工程技术研究 [J]. 农业工程, 2012, 2 (3): 60-64.
- [6] 常换换, 苏友波, 张建生, 等. 空心村废弃宅基地复垦策略 [J]. 农学学报, 2017, 7 (6): 34-37.
- [7] 刘小粉, 贺小思, 易柏宁, 等. 有机肥绿肥配施对水稻土有机碳组分和水稻产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 147-151.
- [8] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 等. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (3): 92-97.
- [9] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (13): 146-152.
- [10] 宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (2): 564-570.
- [11] Han J, Dong Y, Zhang M J, et al. Chemical fertilizer reduction with organic fertilizer effectively improve soil fertility and microbial community from newly cultivated land in the Loess Plateau of China [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 165: 103966.
- [12] Sathya V, Maheswari M, Technology P. Nutrient mineralization during the application of poultry manure [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2017, 16 (3): 905-909.
- [13] Aranguren M, Castellón A, Besga G, et al. Influence of wheat crop on carbon and nitrogen mineralization dynamics after the application of livestock manures [J]. Geoderma, 2021, 402: 115351.
- [14] Sun Z, Qin W, Wang X, et al. Effects of manure on topsoil and

- subsoil organic carbon depend on irrigation regimes in a 9-year wheat-maize rotation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205, 104790.
- [15] Van Groenigena J W, Van Groenigen K J, Koopmans G F, et al. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2019, 338: 525-535.
- [16] 赵海涛, 赵雷明, 姚旭, 等. 添加蚓粪和蛭石对沟塘底泥育苗基质培育番茄幼苗的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2015 (3): 88-94.
- [17] 李彦霏, 邵明安, 王 娇. 蚯蚓粪施用量对黄土区典型土壤团聚体及其有机碳分布的影响 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (3): 90-98.
- [18] 侯丽娜. 蚯蚓粪中微生物群落结构研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [19] Ding Z, Kheir A M, Ali O A, et al. A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111388.
- [20] 刘宏英, 张 红, 李建仁, 等. 菜籽饼肥与化肥配施对马铃薯生长及产量的影响 [J]. *作物研究*, 2020, 35 (5): 435-438.
- [21] 季璇, 冯长春, 郑学博, 等. 饼肥等氮替代化肥对植烟土壤养分、酶活性和氮素利用的影响 [J]. *中国烟草科学*, 2019, 40 (5): 23-29.
- [22] 毛涛, 赵霞, 秦嘉海, 等. 6种有机物料对盐化潮土质量和番茄效益的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39 (4): 125-135.
- [23] 张志丹, 赵兰坡. 土壤酶在土壤有机培肥研究中的意义 [J]. *土壤通报*, 2006, 37 (2): 362-368.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (10): 1209-1216.
- [26] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性 [J]. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 903-910.
- [27] 刘明月, 张凯鸣, 毛伟, 等. 有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响 [J]. *华北农学报*, 2021, 36 (3): 133-141.
- [28] 顾巍巍, 顾树平, 张 强, 等. 有机无机配施对水稻产量及产量构成因素的影响 [J]. *上海农业学报*, 2015, 31 (6): 95-100.
- [29] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响 [J]. *土壤*, 2020, 52 (4): 758-765.
- [30] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (5): 106-112.
- [31] 杨叶华, 张松, 王帅, 等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估 [J]. *草业学报*, 2020, 29 (6): 39-55.
- [32] 于维水, 王碧胜, 王士超, 等. 长期不同施肥下我国4种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (2): 29-34.
- [33] 吕真真, 吴向东, 刘益仁, 等. 长期不同比例有机肥-化肥配施下红壤性水稻土氮素矿化特征 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (4): 47-53.
- [34] 邢素丽, 韩宝文, 刘孟朝, 等. 有机无机配施对土壤养分环境及小麦增产稳定性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (增刊): 135-140.
- [35] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模, 等. 种植绿肥对板栗林土壤养分和生物学性质的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29 (3): 120-123.
- [36] 张珺瞳, 曹卫东, 徐昌旭, 等. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2012 (1): 19-25.
- [37] 林新坚, 林斯, 邱珊莲, 等. 不同培肥模式对茶园土壤微生物活性和群落结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (1): 93-101.
- [38] 席鹏彬, 马永喜, 李德发, 等. 中国菜籽饼粕化学组成特点及其影响因素的研究 [J]. *中国畜牧杂志*, 2004, 40 (10): 12-14.
- [39] 朱寒阳, 傅海平, 张国林, 等. 不同施肥措施对茶园土壤酶活性及土壤肥力的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46 (23): 371-374.

Effects of combined application of winter green manure and organic-chemical fertilizer on nutrients, enzyme activities in reclaimed soil of rural homestead and rice yield

JU Jing¹, ZHANG Huan¹, GU Qiang¹, WANG Wan-lu¹, MAO Wei², YANG Hong-jian³, ZHAO Hai-tao^{1*}
 (1. Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225127; 2. Yangzhou Station of Farmland Quality Protection, Yangzhou Jiangsu 225101; 3. Agricultural Technology Extension Station of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu 210036)

Abstract: In order to explore the effects of combined application of winter green manure and organic-chemical fertilizer on nutrients, enzyme activities in reclaimed soil of rural homestead and rice yield, five treatments were designed, namely: winter wheat + 100% chemical fertilizer in rice season (control 1, CK1), winter green manure + 100% chemical fertilizer in rice season (control 2, CK2), winter green manure + 40% chicken manure combined with 60% chemical fertilizer in rice season (T1); winter green manure + 40% earthworm manure combined with 60% chemical fertilizer in rice season (T2); winter green manure + 40% rapeseed fertilizer combined with 60% chemical fertilizer in rice season (T3). The results



showed that: (1) Compared with CK1, all winter green manure + 40% organic fertilizer combined with 60% chemical fertilizer treatments improved rice yield by 15.9% ~ 37.4% for 2019 and 17.2% ~ 29.6% for 2020. The yield increase of T2 and T3 treatments was higher than that of T1. (2) Compared with CK1, all winter green manure + 40% organic fertilizer combined with 60% chemical fertilizer treatments improved the contents of soil total carbon, total nitrogen, available nitrogen, ammonium nitrogen + nitrate nitrogen ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$), available phosphorus and available potassium by 4.4% ~ 13.2%, 18.9% ~ 24.5%, 23.2% ~ 37.6%, 38.8% ~ 83.2%, 25.7% ~ 59.8%, 1.5% ~ 9.8%, respectively. T3 was more conducive to improving soil total carbon, total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ contents. T2 was more conducive to improving soil available phosphorus and available potassium contents. (3) Compared with CK1, winter green manure + 40% organic fertilizer combined with 60% chemical fertilizer improved or significantly improved soil invertase, catalase, alkaline phosphatase activities as well as maintained or increased soil urease activity. T3 was more conducive to improving soil invertase activity. T2 was more conducive to improving soil urease and alkaline phosphatase activities. (4) Rice yield was significantly positively correlated with the contents of soil total carbon, total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$, available phosphorus, activities of soil invertase, catalase, alkaline phosphatase ($P < 0.05$), especially with the contents of total nitrogen, available nitrogen, activities of invertase, catalase. Therefore, in reclaimed soil of rural homestead, winter green manure + 40% organic fertilizer combined with 60% chemical fertilizer could rapidly improve soil fertility so as to improve the rice yield. Among the three organic fertilizers, the effects of earthworm manure and rapeseed cake fertilizer on soil nutrients and enzyme activities were better than those of chicken manure.

Key words: winter green manure; organic fertilizer; reclaimed soil of rural homestead; soil nutrients; soil enzyme activities; rice yield