

不同菌渣配施化肥对土壤肥力和酶活性的影响

张涵苡^{1,2}, 张敏^{1,3}, 王静^{1,2}, 王澄宇^{1,2}, 周伟^{1,2}, 邓良基^{1,2}

(1.四川农业大学资源学院,成都 611130;

2.自然资源部耕地资源调查监测与保护利用重点实验室,成都 611130;3.成都东软学院,成都 611844)

摘要:为促进菌渣肥料化利用和化肥减量增效,选用毛木耳、香菇和双孢蘑菇菌渣作为有机物料,以成都平原常规化肥施氮量为基准,设置空白处理(CK)、常规化肥(CF)、25%和50%毛木耳菌渣(APR1、APR2)、25%和50%香菇菌渣(LER1、LER2)、25%和50%双孢蘑菇菌渣(ABR1、ABR2),共8个处理,探讨不同菌渣配施化肥对土壤肥力和土壤酶活性的差异性。结果表明:菌渣配施化肥处理能有效增强土壤蔗糖酶和脲酶活性,提高土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷和速效钾含量,促进作物对氮素的积累,提高氮肥利用率和作物有效穗数,进而促产。然而菌渣C/N比($C/N > 30$)、 P_2O_5 替代率和 K_2O 替代率越高,导致养分利用率下降,产量显著降低, P_2O_5 和 K_2O 的施入对土壤和作物的正向效应不足以补偿,使其与作物产量呈显著负相关。综合来看,选用C/N比接近30的菌渣,水稻季选用50%或以下的氮肥替代率和小麦季选用25%的氮肥替代率有利于作物稳产增产。

关键词:菌渣;土壤肥力;土壤酶活性;产量

中图分类号:S141; S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)06-0364-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.044

Effects of Combined Application of Chemical Fertilizers with Different Mushroom Residues on Soil Fertility and Enzymes Activities

ZHANG Hanyi^{1,2}, ZHANG Min^{1,3}, WANG Jing^{1,2},

WANG Chengyu^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}, DENG Liangji^{1,2}

(1.College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2.Key Laboratory of Investigation and Monitoring, Protection and Utilization for Cultivated Land

Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611130; 3.Chengdu Neusoft University, Chengdu 611844)

Abstract: In order to promote the resource utilization of mushroom residues, and to reduce the application rate of chemical fertilizers and increase its use efficiency, the residues of *Auricularia polytricha*, *Lentinus edobes*, and *Agaricus bisporus* were selected as organic materials in this study. Based on the nitrogen application of conventional chemical fertilizers in Chengdu Plain, a total 8 treatments were set: blank treatment (CK), conventional chemical fertilizer (CF), 25% and 50% *Auricularia polytricha* residues (APR1, APR2), 25% and 50% *Lentinus edobes* residues (LER1, LER2), 25% and 50% *Agaricus bisporus* residues (ABR1, ABR2). The differences in soil fertility and soil enzymes activities of different mushroom residues and chemical fertilizers were discussed. The results showed that the mushroom residue and chemical fertilizers could effectively enhance the activities of soil sucrase and urease, increase the contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium, promote the accumulation of nitrogen in crops, and improve the utilization rate of nitrogen fertilizer, thereby promoting crop production. However, the higher C/N ratio ($C/N > 30$), P_2O_5 replacement rate and K_2O replacement rate of mushroom residues resulted in a decrease in nutrient use efficiency and a significant decrease in yield. Even the positive effects of P_2O_5 and K_2O on soil and crops were not enough to compensate, which was significantly negatively correlated with crop yield. On the whole, the mushroom residues with a C/N ratio close to 30, the use of 50% or less of nitrogen fertilizer replacement rate in the rice season, and the use of 25% nitrogen fertilizer

收稿日期:2022-04-20

资助项目:四川省科技支撑计划项目(22NZZH0037,2021YFN0018)

第一作者:张涵苡(1997—),女,硕士研究生,主要从事农业废弃物利用与土壤质量研究。E-mail: 306726559@qq.com

通信作者:邓良基(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事农业资源利用及农业生态研究。E-mail: auh6@sicau.edu.cn

replacement rate in the wheat season are conducive to increasing crop yield.

Keywords: mushroom residue; soil fertility; soil enzyme activity; yield

长期大量施用化肥导致土壤酸化、肥力下降和农田污染等一系列问题^[1],已成为我国农业生产中重要的限制因子。我国食用菌产业发达,2020 年食用菌产量已达 4 061.4 万 t,根据菌渣平均产生量大约是食用菌的 5 倍计算,产生约 2 亿 t 的菌渣^[2],但长期以来菌渣的随意处置和焚烧造成生态环境严重污染。成都平原作为我国重要的粮食生产基地和食用菌重点产区,同样面临以上问题。

菌渣的理化特性与食用菌培养基原料成分密切相关。常见的培养基原料有秸秆、木屑、棉籽壳、玉米芯、麦麸子、畜禽粪便等^[3],以及根据需要所添加一定量的糖、氮源、石灰和石膏等物质^[4],因而菌渣中含有丰富的营养物质。菌渣与化肥配合施用除能提升土壤有机碳含量外,还能提高土壤全磷、有效磷和速效钾含量^[5-6]和土壤酶活性^[7],有效提升作物产量^[8]。但也有学者研究^[9-10]发现,长期有机物料配施化肥降低土壤过氧化氢酶活性和酚氧化酶活性,试验结果存在差异的原因,可能是由于土壤类型、耕作方式以及施用不同有机物料等要素的不同,还可能与有机物料配施化肥处理中化肥对土壤酶活性产生负面效应有关^[11]。

根据上述研究现状,针对目前菌渣配施化肥方面研究涉及的菌渣种类单一,缺乏种类间(C/N)的比较研究,以及菌渣替代化肥比例研究较少等理论和实践问题,本研究探讨不同菌渣与化肥配合施用对农田土壤肥力和土壤酶活性的影响,旨在优选出稻麦轮作模式下适宜的菌渣种类(C/N)、菌渣配合化肥施用的化肥替代率,为降低食用菌菌渣弃置对环境的影响、提

升土壤质量以及提高稻麦产量提供理论依据和支持,有利于对后续不同菌渣配合化肥施用模式的开发。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验于 2020 年 5 月在成都市崇州市四川农业大学现代农业研发基地(30°33′27″N,103°38′34″E)开展。地处成都平原典型的稻—麦轮作区,属于亚热带季风气候,年平均气温 16.5 ℃,平均降水量 1 525.3 mm。土壤类型属于成都平原灰棕冲积物发育而成的渗育型水稻土,前茬作物为小麦。供试小区耕层土壤有机碳含量 19.01 g/kg,全氮含量 1.99 g/kg,全磷含量 0.540 g/kg,有效磷含量 10.21 mg/kg,速效钾含量 155.00 mg/kg。

1.2 试验材料

试验小区供试的水稻品种为“宜香优 2115”,于 2020 年 5 月 29 日移栽,定植秧苗 10.8 万穴/hm²,每穴定植 2 株,9 月 10 日收获;小麦品种为“内麦 836”,于 2020 年 10 月 28 日按 110 kg/hm²撒施播种,翌年 4 月 29 日收获。供试化肥为尿素(含 N 量 46.0%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 量 12.0%)和氯化钾(含 K₂O 量 60%)。试验材料为毛木耳菌渣,来自什邡大丰收农业科技有限公司,菌渣基料包括棉籽壳、木屑、玉米芯、磷酸二氢钾、石灰石膏等;香菇菌渣来自四川康梨沃生物科技有限公司,菌渣基料包括木屑、麸皮、糖、石灰石膏等;双孢蘑菇菌渣来自成都市富瑞达生物技术有限公司,菌渣基料包括稻草或麦秆、鸡粪、黑土等。3 种菌渣的基本性质见表 1。

表 1 3 种菌渣的基本性质

有机物料	pH	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)	OC/(g·kg ⁻¹)	C/N
毛木耳菌渣(APR)	8.64	8.07	2.36	12.33	368.33	45.65
香菇菌渣(LER)	6.95	14.23	5.10	9.27	435.90	30.63
双孢蘑菇菌渣(ABR)	7.01	4.45	6.47	22.38	221.18	49.74

注:毛木耳菌渣(*Auricularia polytricha* residue, APR);香菇菌渣(*Lentinus edodes* residue, LER);双孢蘑菇菌渣(*Agaricus bisporus* residue, ABR)。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,以成都平原稻—麦轮作体系常规化肥氮施用量为等氮施肥水平基准,设置 8 组处理:空白对照(CK)、常规化肥(CF)、APR1(25%毛木耳菌渣)、APR2(50%毛木耳菌渣)、LER1(25%香菇菌渣)、LER2(50%香菇菌渣)、ABR1(25%双孢蘑菇菌渣)、ABR2(50%双孢蘑菇菌渣),其中 25%,50%表示氮肥替代率。试验的每组处理设 3 个平行,共设 24 个小区,小区面积 20 m²(4 m×5 m)。水稻季和小麦季常规化肥施肥量参照成都平原氮磷钾平均施肥水平(表 2 中 CF 处理),各施肥处理按照等氮

施肥的条件,磷钾量不足的部分用过磷酸钙和氯化钾补充至常规施肥处理量。种植前,菌渣直接覆于土壤表层,再用钉耙均匀翻入下层,菌渣和氮、磷、钾肥均一次性施入。根据当地水稻和小麦种植的田间管理措施对试验区进行统一灌排、病虫害及杂草防治管理,水稻季和小麦季种植前旋耕松土。

1.4 样品采集与分析

水稻、小麦收获期时于每个试验小区内选取 3 穴植株用以考种,记录株高、穗长、有效穗数量等,收割 15 穗植物样品晒干后计算穗粒数、千粒重、结实率等。各试验小区采集 2 份 1 m²长势一致的作物籽

粒,脱粒风干后测定产量。水稻和小麦收获期时分别在每个小区内按“S”形采样法采集 5 穴植株样品,洗净后在 105 ℃ 的烘箱内杀青 30 min,75 ℃ 下烘干至恒重,待样品冷却后称重,测定干物质质量,粉碎过筛,用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮植物样品后测定其全氮、

全磷、全钾含量^[12]。氮肥农学利用率和表观利用率公式为:氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区籽粒产量—无氮区籽粒产量)/氮肥施用量;氮肥表观利用率(%)=(施氮区地上部氮素积累量—无氮区地上部氮素积累量)/氮肥施用量×100%。

表 2 试验施肥方案

处理	水稻季/(kg·hm ⁻²)				小麦季/(kg·hm ⁻²)				菌渣替代率/%		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	菌渣	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	菌渣	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
CF	150	75	75	—	180	90	90	—	0	0	0
APR1	112.5	49.9	5.9	4647.4	135	59.9	7.1	5576.9	25	33.42	92.07
APR2	75	24.9	0.9	9294.8	90	29.8	—	11153.8	50	66.85	184.15
LER1	112.5	44.2	45.6	2634.9	135	53.1	91.1	3161.9	25	41.04	39.25
LER2	75	13.4	16.1	5269.8	90	16.1	32.3	6323.8	50	82.08	78.49
ABR1	112.5	—	—	8432.8	135	—	—	10119.3	25	166.62	303.18
ABR2	75	—	—	16865.5	90	—	—	20238.6	50	333.25	606.36

土壤样品在水稻种植前和小麦收获期时按 5 点混合取样法采集各试验小区耕层(0—20 cm)土壤,再采用四分法取混合样品,剔除杂质装袋。样品带回放于室内进行自然风干,风干样磨细后过 1 mm 及 100 目尼龙筛,并装袋密封储存,用于后续土壤养分和土壤酶活性测定分析,土壤养分指标具体测定方法参考《土壤农化分析》^[12],土壤有机碳采用 H₂SO₄—K₂Cr₂O₇ 外加热法;全氮采用半微量开氏法;全磷采用 HClO₄—H₂SO₄ 消煮—钼锑抗比色法;有效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法。土壤酶活性具体测定方法参考《土壤酶及其研究法》^[13],蔗糖酶采用二硝基水杨酸法;脲酶采用苯酚钠比色法;酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠法。

1.5 数据分析

数据的初步处理与制表用 Excel 2019 完成,数据制图由 Origin 2021 完成,运用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),配合 Duncan 检验多处理间均值的显著性和相关性分析。

2 结果与分析

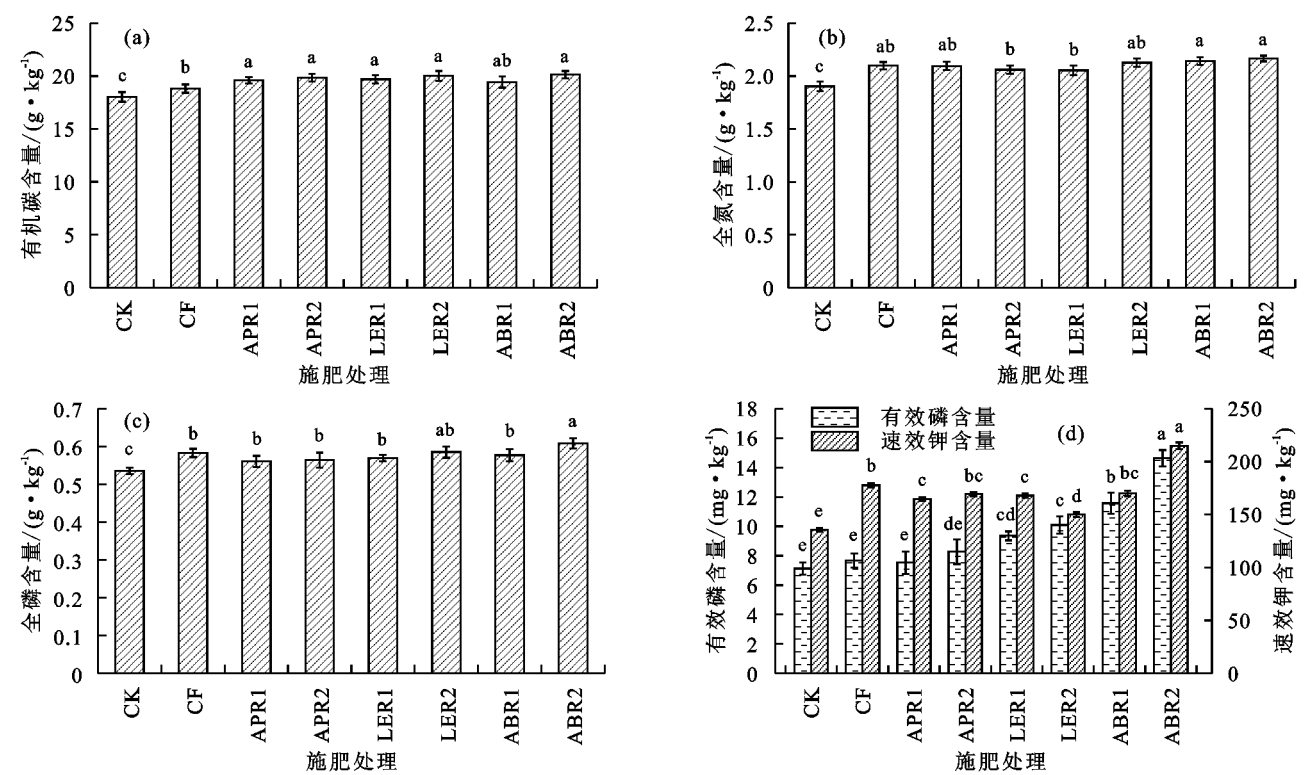
2.1 不同菌渣配施化肥对土壤养分的影响

不同菌渣配施化肥处理稻—麦轮作 1 年后土壤养分情况见图 1。不同菌渣配施化肥处理较 CK 处理均能显著提高土壤有机碳含量($p<0.05$)(图 1a),与单施化肥的 CF 处理相比提高 3.27%~6.96%,并且 50% 氮肥替代率的菌渣配施化肥处理的土壤有机碳含量高于其 25% 氮肥替代率的菌渣配施化肥处理,但不同菌渣配施化肥处理的土壤有机碳含量差异不显著。单施化肥和菌渣配施化肥处理土壤全氮含量显著高于 CK 处理($p<0.05$)(图 1b),与 CF 处理相比,LER2 处理、ABR1 处理和 ABR2 处理土壤全

氮含量提高 1.33%~3.20%,各菌渣配施化肥处理的土壤全氮含量较种植前提高 3.18%~8.81%。各施肥处理的土壤全磷含量较 CK 处理显著提升 4.61%~13.57%($p<0.05$),与 CF 处理相比,ABR2 处理土壤全磷含量显著提高 4.40%($p<0.05$)(图 1c)。土壤有效磷含量仅双孢蘑菇配施化肥处理较种植前显著上升,ABR1 处理和 ABR2 处理分别提升 13.40%和 43.32%(图 1d)。单施化肥和菌渣配施化肥处理的土壤速效钾含量较 CK 处理显著提高 10.57%~58.48%($p<0.05$),与 CF 处理相比,仅 ABR2 处理土壤速效钾含量显著提高 21.01%($p<0.05$)(图 1d)。综合来看,单施化肥和菌渣配合化肥施用处理均能显著提升土壤有机碳、全氮、全磷、速效钾含量,土壤有机碳、全磷、有效磷含量随菌渣替代率的增加而增加。

2.2 不同菌渣配施化肥对土壤酶活性的影响

不同菌渣配施化肥处理稻—麦轮作 1 年后土壤酶活性见表 3。收获期时,土壤酶活性各处理间均有显著性差异($p<0.05$)。ABR2 处理土壤蔗糖酶活性显著高于其余各处理($p<0.05$),为 21.33 mg/(g·d),LER2 处理、ABR1 处理、ABR2 处理相较于单施化肥的 CF 处理土壤蔗糖酶活性显著提高 40.44%,44.79%,134.59%($p<0.05$)。单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理土壤脲酶活性提高 10.59%~31.12%($p<0.05$),收获期各施肥处理土壤脲酶活性较水稻种植前提高 8.27%~28.36%。各施肥处理的土壤酸性磷酸酶活性较种植前下降了 13.83%~20.75%,单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理土壤酸性磷酸酶活性显著提高了 13.81%~23.74%($p<0.05$)。说明单施化肥和菌渣配施化肥能有效提升土壤蔗糖酶和脲酶活性,土壤蔗糖酶和脲酶活性随着菌渣替代率的增加而增加。



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同施肥处理对土壤养分的影响

表 3 不同施肥处理对土壤酶活性的影响			
处理	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	酸性磷酸酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
基础	8.89	0.38	79.00
CK	7.45±0.87d	0.37±0.03c	55.15±2.63c
CF	9.09±1.32cd	0.44±0.03ab	62.89±3.29b
APR1	10.43±1.03bcd	0.41±0.02bc	68.24±3.62a
APR2	12.17±2.59bc	0.48±0.03a	62.77±1.96b
LER1	10.60±1.36bcd	0.46±0.04ab	63.84±3.11ab
LER2	12.77±1.76b	0.48±0.02a	64.29±2.76ab
ABR1	13.16±2.44b	0.47±0.02a	63.39±2.58ab
ABR2	21.33±1.49a	0.49±0.03a	66.92±1.66ab

注:表中数据为平均值±标准值;同列小写字母不同表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.3 不同菌渣配施化肥对作物养分利用和作物产量及其构成因子的影响

由图 2 可知,水稻季收获期时地上部氮素积累量表现为 LER1>LER2>ABR2>CF>ABR1>APR2>APR1>CK,LER1 处理较 CF 处理显著增加 15.99%($p<0.05$);小麦季收获期时地上部积累量表现为 ABR1>CF>ABR1>LER1>LER2>APR1>APR2>CK,ABR2 处理较 CF 处理显著增加 3.44%($p<0.05$)。说明水稻季香菇菌渣配施化肥处理能显著提高作物地上部氮素积累量,小麦季双孢蘑菇菌渣配施化肥处理和常规化肥处理能显著提高作物地上部氮素积累量。

由图 3 可知,水稻季收获期时,各施肥处理表观

利用率为 18.22%~42.22%,LER1 处理的表现利用率最高(42.22%),LER1、LER2 处理较 CF 处理表观利用率显著增加 40.78%,55.11%($p<0.05$);各施肥处理农学利用率为 9.87~21.00 kg/kg,其中 LER2 处理的农学利用率最高(21.00 kg/kg),较 CF 处理显著增加 24.07%($p<0.05$)。小麦季收获期时,各施肥处理表观利用率为 31.27%~51.61%,ABR2 处理表观利用率最高(51.61%),较 CF 处理显著提高 6.52%($p<0.05$);各施肥处理农学利用率为 12.98~16.88 kg/kg,CF 处理、APR1 处理和 LER1 处理的农学利用率显著高于其余施肥处理($p<0.05$),LER1 处理较 CF 处理增加 0.93%。综上可知,水稻季木耳菌渣和香菇菌渣配施化肥处理的农学利用率随菌渣替代率的增加而上升,小麦季菌渣配施化肥处理的农学利用率随菌渣替代率的增加而降低。

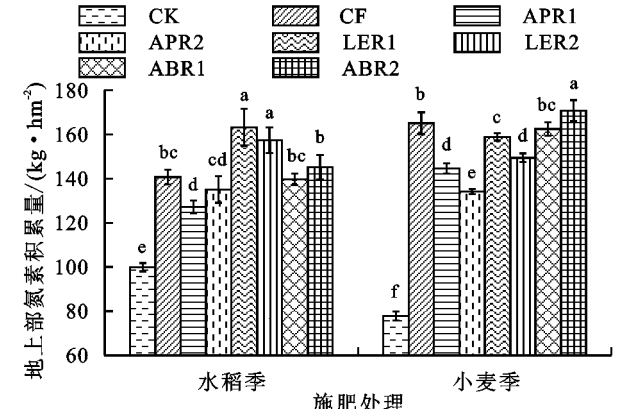
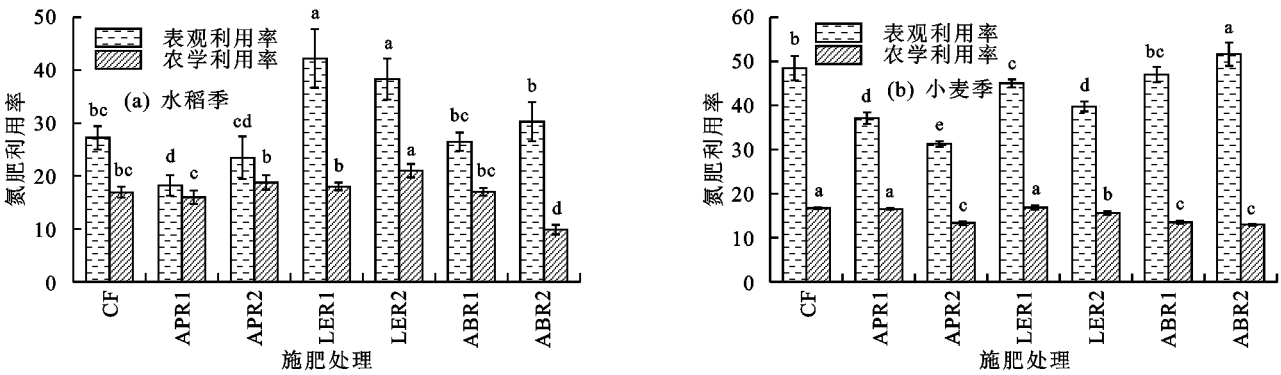


图 2 不同施肥处理对作物地上部氮素积累量的影响



注:氮肥表观利用率单位为%;氮肥农学利用率单位为 kg/kg。

图 3 不同施肥处理对氮肥利用率的影响

不同菌渣配施化肥对水稻产量及其构成因子的影响见表 4。APR2 处理有效穗数为 $233.0 \times 10^4/\text{hm}^2$ ，显著高于其余处理 ($p < 0.05$)，单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理有效穗数显著提高 $17.1\% \sim 48.1\%$ ($p < 0.05$)；CK 处理的千粒重和结实率均高于其余处理；LER2 处理的水稻产量最高，为 $10\,618.0\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理水稻产量显著提高 $19.8\% \sim 42.2\%$ ($p < 0.05$)，香菇菌渣配施化肥处理的水稻产量高于木耳菌渣和双孢蘑菇菌渣配施化肥处理。

表 4 不同施肥处理对水稻产量及其构成因子的影响

处理	穗粒数/粒	有效穗数/ ($\times 10^4$ 穗 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒重/g	结实率/%	实际产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	161.1 $\pm$ 3.7d	157.3 $\pm$ 6.2e	36.6 $\pm$ 0.1a	93.7 $\pm$ 0.6a	7468.3 $\pm$ 122.6e
CF	203.7 $\pm$ 1.5a	207.1 $\pm$ 6.2c	35.4 $\pm$ 0.1c	93.1 $\pm$ 0.4ab	10007.0 $\pm$ 152.9bc
APR1	182.2 $\pm$ 1.0bc	184.2 $\pm$ 3.0d	35.9 $\pm$ 0.2b	93.2 $\pm$ 0.4ab	9864.1 $\pm$ 194.6c
APR2	189.0 $\pm$ 0.8abc	233.0 $\pm$ 3.0a	36.0 $\pm$ 0.7b	90.9 $\pm$ 0.4d	10284.9 $\pm$ 203.9b
LER1	204.9 $\pm$ 2.8a	219.0 $\pm$ 1.7b	35.0 $\pm$ 0.2d	90.9 $\pm$ 0.3d	10171.7 $\pm$ 108.5b
LER2	195.3 $\pm$ 1.1ab	223.0 $\pm$ 4.6b	35.2 $\pm$ 0.3cd	92.2 $\pm$ 0.4c	10618.0 $\pm$ 189.0a
ABR1	200.8 $\pm$ 5.0a	208.1 $\pm$ 1.7c	35.3 $\pm$ 0.7cd	91.1 $\pm$ 0.3d	10021.6 $\pm$ 109.7bc
ABR2	173.3 $\pm$ 1.9cd	189.2 $\pm$ 4.6d	36.0 $\pm$ 0.3b	92.9 $\pm$ 0.5b	8948.9 $\pm$ 136.1d
与产量相关性	0.755**	0.708**	-0.741**	-0.542**	—

注: * 表示 0.05 水平显著相关; ** 表示 0.01 水平显著相关。下同。

不同菌渣配施化肥对小麦产量及其构成因子的影响见表 5。单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理有效穗数显著提高 $9.9\% \sim 27.0\%$ ($p < 0.05$)；CF、APR1、APR2 和 LER1 处理较 CK 处理千粒重分别显著增加 6.5% ， 9.3% ， 11.5% ， 10.3% ($p < 0.05$)；LER1 处理的小麦产量最高，为 $6\,847.9\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理小麦产量显著提高 $61.3\% \sim 79.8\%$ ($p < 0.05$)。综上可知，有效穗数对水稻产量和小麦产量的影响更显著，菌渣配施化肥处理能够获得显著高于不施肥下的作物产量，不能获得显著高于常规化肥下的作物产量。

由表 6 可知，菌渣 C/N 比、 P_2O_5 替代率、 K_2O 替代率与水稻产量呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$)，菌渣 C/N 比、N 替代率、 P_2O_5 替代率、 K_2O 替代率与小麦产量呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$)。说明随着菌渣 C/N 比 ($\text{C}/\text{N} > 30$) 的提高，菌渣施用量增加，显著降低作物产量，且 P_2O_5 、 K_2O 施入量的负相关性更高，这与等氮施肥条件下，菌渣 C/N 比过高造成

理；LER2 处理的水稻产量最高，为 $10\,618.0\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理水稻产量显著提高 $19.8\% \sim 42.2\%$ ($p < 0.05$)，香菇菌渣配施化肥处理的水稻产量高于木耳菌渣和双孢蘑菇菌渣配施化肥处理。

表 4 不同施肥处理对水稻产量及其构成因子的影响

处理	穗粒数/粒	有效穗数/ ($\times 10^4$ 穗 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒重/g	结实率/%	实际产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	161.1 $\pm$ 3.7d	157.3 $\pm$ 6.2e	36.6 $\pm$ 0.1a	93.7 $\pm$ 0.6a	7468.3 $\pm$ 122.6e
CF	203.7 $\pm$ 1.5a	207.1 $\pm$ 6.2c	35.4 $\pm$ 0.1c	93.1 $\pm$ 0.4ab	10007.0 $\pm$ 152.9bc
APR1	182.2 $\pm$ 1.0bc	184.2 $\pm$ 3.0d	35.9 $\pm$ 0.2b	93.2 $\pm$ 0.4ab	9864.1 $\pm$ 194.6c
APR2	189.0 $\pm$ 0.8abc	233.0 $\pm$ 3.0a	36.0 $\pm$ 0.7b	90.9 $\pm$ 0.4d	10284.9 $\pm$ 203.9b
LER1	204.9 $\pm$ 2.8a	219.0 $\pm$ 1.7b	35.0 $\pm$ 0.2d	90.9 $\pm$ 0.3d	10171.7 $\pm$ 108.5b
LER2	195.3 $\pm$ 1.1ab	223.0 $\pm$ 4.6b	35.2 $\pm$ 0.3cd	92.2 $\pm$ 0.4c	10618.0 $\pm$ 189.0a
ABR1	200.8 $\pm$ 5.0a	208.1 $\pm$ 1.7c	35.3 $\pm$ 0.7cd	91.1 $\pm$ 0.3d	10021.6 $\pm$ 109.7bc
ABR2	173.3 $\pm$ 1.9cd	189.2 $\pm$ 4.6d	36.0 $\pm$ 0.3b	92.9 $\pm$ 0.5b	8948.9 $\pm$ 136.1d
与产量相关性	0.755**	0.708**	-0.741**	-0.542**	—

注: * 表示 0.05 水平显著相关; ** 表示 0.01 水平显著相关。下同。

不同菌渣配施化肥对小麦产量及其构成因子的影响见表 5。单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理有效穗数显著提高 $9.9\% \sim 27.0\%$ ($p < 0.05$)；CF、APR1、APR2 和 LER1 处理较 CK 处理千粒重分别显著增加 6.5% ， 9.3% ， 11.5% ， 10.3% ($p < 0.05$)；LER1 处理的小麦产量最高，为 $6\,847.9\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，单施化肥和菌渣配施化肥处理较 CK 处理小麦产量显著提高 $61.3\% \sim 79.8\%$ ($p < 0.05$)。综上可知，有效穗数对水稻产量和小麦产量的影响更显著，菌渣配施化肥处理能够获得显著高于不施肥下的作物产量，不能获得显著高于常规化肥下的作物产量。

表 5 不同施肥处理对小麦产量及其构成因子的影响

处理	穗粒数/粒	有效穗数/ ($\times 10^4$ 穗 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒重/g	实际产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	44.0 $\pm$ 3.7a	280.3 $\pm$ 8.7e	49.1 $\pm$ 1.5d	3809.3 $\pm$ 57.2d
CF	52.6 $\pm$ 4.4a	331.7 $\pm$ 5.0c	52.3 $\pm$ 0.8abc	6820.0 $\pm$ 40.9a
APR1	52.9 $\pm$ 6.6a	336.3 $\pm$ 6.7bc	53.7 $\pm$ 1.5abc	6782.7 $\pm$ 38.3a
APR2	51.0 $\pm$ 5.1a	328.0 $\pm$ 4.4c	54.8 $\pm$ 1.4a	6215.0 $\pm$ 72.8c
LER1	48.7 $\pm$ 6.6a	356.0 $\pm$ 7.9a	54.2 $\pm$ 0.4ab	6847.9 $\pm$ 85.7a
LER2	49.2 $\pm$ 4.9a	344.0 $\pm$ 8.2b	51.3 $\pm$ 2.1cd	6618.0 $\pm$ 76.7b
ABR1	50.0 $\pm$ 3.9a	312.0 $\pm$ 5.0d	51.7 $\pm$ 1.5bc	6245.0 $\pm$ 53.7c
ABR2	50.7 $\pm$ 2.7a	308.0 $\pm$ 4.6d	45.8 $\pm$ 1.4d	6146.0 $\pm$ 36.0c
与产量相关性	0.466*	0.844**	0.419*	—

表 6 菌渣 C/N、N 替代率、 P_2O_5 替代率、 K_2O 替代率和产量的相关性

项目	菌渣 C/N	N 替代率	P_2O_5 替代率	K_2O 替代率
水稻产量	-0.621**	-0.054	-0.721**	-0.764**
小麦产量	-0.705**	-0.620**	-0.758**	-0.818**

注: n=18。

3 讨论

菌渣与化肥配施能够增加土壤养分,提高氮肥利用率^[14-16]。本研究中菌渣配施化肥处理较单施化肥处理提高土壤有机碳含量,较未施肥处理提高土壤全氮、全磷、有效磷、速效钾的含量,这是因为菌渣含有丰富的有机物质,替代化肥施用为农田系统带入大量能源物质,配施化肥能够激发土壤微生物活性,促进土壤有机碳氮磷的矿化分解^[17]。本研究结果显示,菌渣替代化肥比例越高,土壤有机碳含量越高,这是因为更多的菌渣替代化肥氮施入土壤中,碳源输入量超过土壤有机碳的矿化速率^[18],造成菌渣的腐解残留率较高,因此土壤有机碳含量得以积累。

由于土壤中的微生物活性和酶活性具有良好的“互动效应”^[19],导致有机物料还田腐解后,改善微生物生存条件,提高土壤酶活性,增加土壤养分含量^[20-21]。本试验结果证明,菌渣配施化肥能够提升土壤蔗糖酶和脲酶活性,且随菌渣替代率的升高而增加,这与张鹏等^[22]的研究一致。有研究^[23]表明,有机肥配施化肥能够显著提高土壤酸性磷酸酶的活性,而本研究结果中,酸性磷酸酶活性下降可能是种植前的农闲期前茬作物收割后,根系留在土壤中为微生物增殖提供能源物质,导致种植前酸性磷酸酶活性较高^[24],也可能是试验误差造成的,但是研究结果可以证明,施肥较未施肥可显著提高土壤酸性磷酸酶活性。

有研究^[25]表明,有机物料配施化肥能够减少土壤氮素损失,增加土壤含氮量,提高土壤供氮能力和氮素有效性,促进作物的吸收利用,从而提高氮素利用率。本研究中,香菇菌渣配施化肥处理的水稻产量显著高于木耳菌渣和双孢蘑菇菌渣,氮肥利用率也最高,且大部分菌渣配施化肥处理氮肥利用率高于单施化肥处理,这与石鑫蕊等^[26]研究结果相似,说明菌渣配施化肥处理能维持较高的氮素利用率,提高氮素对产量的贡献。木耳菌渣和香菇菌渣配施化肥处理对水稻产量的提升随菌渣氮肥替代率的增加而增加,双孢蘑菇菌渣则表现相反。25%氮肥替代率的香菇菌渣配施化肥处理对小麦产量提升效果甚至优于单施化肥处理,3种菌渣配施化肥的小麦产量均为25%氮肥替代率高于50%氮肥替代率。25%氮肥替代率的香菇菌渣配施化肥处理小麦农学利用率与CF处理无显著差异,这与李燕青^[27]研究结果相似,不同比例有机肥配施化肥对麦—玉轮作的氮肥利用率与化肥处理无显著差异。这可能是由于不同作物对养分的需求、吸收利用不同导致。有机物料与化肥配施可以增加有效穗数,并且改善光合特性,延长灌浆持续期^[28],这与本研究结果相似,水稻产量和小麦产量主要通过增加有效穗数来提高作物产量。

已有研究^[29]表明,菌渣氮磷钾素替代率与稻麦产量呈显著正相关关系,稻麦产量的提升效率随菌渣的化肥氮磷钾养分替代率的增加而增加。而本研究中,菌渣 C/N 比、 P_2O_5 替代率和 K_2O 替代率与水稻产量和小麦产量呈显著负相关关系,是因为等氮量施肥水平条件下, C/N 比高于 30 的菌渣配合化肥施用,能够获得显著高于不施肥的作物产量,不能获得显著高于常规化肥施用的作物产量,并随着菌渣施用量的增加,呈显著降低的趋势;随着菌渣施入量的增加,养分利用效率也随之下降,造成作物产量显著降低,以至于菌渣 P_2O_5 、 K_2O 施入对土壤和作物的正向效应也不足以补偿,使其与产量呈极显著负相关,只有 C/N 比接近 30 的香菇菌渣(30.63),在 50% 的氮肥替代率水平下,水稻产量显著高于常规化肥处理。有研究^[30]表明,有机物料 C/N 比越高,施入土壤后土壤微生物与作物对矿质态氮的竞争激烈,影响氮素的供应能力,并且钾肥过量施用引起水稻拔节前吸钾比例较大,从而减少有效穗数,造成减产^[31],也不利于籽粒氮素农学利用率的提高^[32]。水稻季时,由于水稻中后期对养分需求较大,化肥养分释放快,菌渣矿化分解能持续提供水稻所需养分^[33],同时有研究^[34]表明,有机肥替代率越高,对土壤养分、微生物量碳氮和酶活性的提高效果更显著,有机替代比例在 30%~60% 时能够同时显著提高水稻产量和籽粒含氮量^[35]。因此,水稻季选用 50% 或以下氮肥替代率的菌渣配施化肥处理。小麦季时,菌渣替代率越高,有机物质释放缓慢以至于不能满足小麦在生育前期养分需求^[36],小麦季需选用 25% 氮肥替代率的菌渣配施化肥处理。

4 结论

稻—麦轮作下不同菌渣配施化肥均能够提升土壤养分含量,加强土壤蔗糖酶、脲酶活性,提高氮肥利用率,进而促产。C/N>30 的菌渣配合化肥施用后作物产量显著高于未施肥处理,小于常规化肥处理,随着菌渣 C/N 和施用量的增加,各施肥处理的产量也显著降低。因此,推荐在菌渣种类选择上,选用 C/N 接近 30 的菌渣;在菌渣用量上,水稻季选用 50% 或以下的氮肥替代率,小麦季选用 25% 的氮肥替代率。此试验仅做了 1 年,且仅采集了 3 种菌渣,测定菌渣的性质较少,今后可通过广泛采集菌渣数据或进行长期试验,对试验结果采用适当的模型分析,从而为不同菌渣肥料化利用提供参考依据。

参考文献:

- [1] 宁川川,王建武,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J].生态环境学报,2016,25(1): 175-181.

- [2] 刘景坤,吴松展,程汉亭,等.食用菌菌渣基质化利用研究进展[J].热带作物学报,2019,40(1):191-198.
- [3] 孟丽.食用菌常用培养料配方 200 种[M].北京:中国农业出版社,1999:18-123.
- [4] 周祥,严媛媛,陈爱晶.食用菌菌渣资源化利用研究进展[J].食用菌,2018,40(1):9-12.
- [5] 陈源泉,隋鹏,严玲玲,等.有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J].农业工程学报,2016,32(增刊 2):94-102.
- [6] 王笃超,吴景贵,李建明.不同有机物料对连作大豆土壤养分含量及生物性状的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):258-262.
- [7] 陈文博,王旭东,石思博,等.长期菌渣化肥配施对稻田土壤酶活性的影响及交互效应[J].浙江农林大学学报,2021,38(1):21-30.
- [8] 徐聪,吴迪,王磊,等.菌渣施用对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响[J].土壤,2021,53(3):491-498.
- [9] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):406-410.
- [10] Li T, Gao J S, Bai L Y, et al. Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil[J].Soil and Tillage Research,2019,195:e104428.
- [11] 陈欢,李玮,张存岭,等.淮北砂姜黑土酶活性对长期不同施肥模式的响应[J].中国农业科学,2014,47(3):495-502.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:30-271.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:274-311.
- [14] Fan J L, Xiao J, Liu D Y, et al. Effect of application of dairy manure, effluent and inorganic fertilizer on nitrogen leaching in clayey fluvo-aquic soil: A lysimeter study[J].Science of the Total Environment,2017,592:206-214.
- [15] 陈利军,蒋璃霁,王浩田,等.长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J].土壤,2020,52(3):451-457.
- [16] 魏猛,张爱君,诸葛玉平,等.长期不同施肥方式对黄潮土肥力特征的影响[J].应用生态学报,2017,28(3):838-846.
- [17] 李忠徽.有机肥在黄土高原土壤中的碳、氮周转特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [18] 丁雪丽,韩晓增,乔云发,等.农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J].土壤通报,2012,43(3):737-744.
- [19] 吴海勇,李明德,刘琼峰,等.稻草不同途径还田对土壤结构及有机质特征的影响[J].土壤通报,2012,43(4):836-841.
- [20] 马想,徐明岗,赵惠丽,等.我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子[J].中国农业科学,2019,52(9):1564-1573.
- [21] 邓欧平,谢汀,李燕,等.稻麦轮作下不同还田模式对土壤酶活性的影响研究[J].农业环境科学学报,2013,32(10):2027-2034.
- [22] 张鹏,贾志宽,路文涛,等.不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5):1122-1130.
- [23] Wang C, Ning P, Li J Y, et al. Responses of soil microbial community composition and enzyme activities to long-term organic amendments in a continuous tobacco cropping system[J].Applied Soil Ecology,2022,169:e104210.
- [24] 卢越,张健琳,杨兰芳.不同作物生长和施肥对土壤酶活性的影响[J].环境生态学,2019,1(6):81-85.
- [25] 赵颖,周枫,罗佳琳,等.水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响[J].土壤,2021,53(5):937-944.
- [26] 石鑫蕊,任彬彬,江琳琳,等.有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):154-162.
- [27] 李燕青.不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [28] 张晶,张定一,王丽,等.不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):238-243.
- [29] 刘唯佳,毛昆明,唐祺超,等.菌渣替代部分化肥养分施用对土壤养分含量及稻麦产量的影响[J].四川农业大学学报,2021,39(3):323-330.
- [30] 娄燕宏,诸葛玉平,魏猛,等.外源有机物料对土壤氮矿化的影响[J].土壤通报,2009,40(2):315-320.
- [31] 王强盛,甄若宏,丁艳锋,等.钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J].中国农业科学,2004(10):1444-1450.
- [32] 韦还和,孟天瑶,李超,等.钾肥用量对甬优籼粳杂交稻物质积累及其产量的影响[J].作物学报,2016,42(8):1201-1214.
- [33] 王金洲,卢昌艾,张文菊,等.中国农田土壤中有有机物料腐解特征的整合分析[J].土壤学报,2016,53(1):16-27.
- [34] 李其胜,杨凯,汪志鹏,等.稻—油轮作下有机替代对土壤胞外酶活性及多功能性的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):345-352,360.
- [35] 任科宇,陆东明,邹洪琴,等.有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(4):716-725.
- [36] 邓欧平,李瀚,周稀,等.菌渣还田对土壤有效养分动态变化的影响[J].中国土壤与肥料,2014(4):18-23.