

周喜新,刘 婵,李海平,等. 添加不同秸秆对酸性水稻土 pH 值及有机碳组分的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(15):225-230.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.15.031

添加不同秸秆对酸性水稻土 pH 值及有机碳组分的影响

周喜新¹, 刘 婵¹, 李海平³, 范 江³, 张锦韬⁴, 陈 闰², 张 毅¹

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128;

3. 云南省烟草公司保山市公司, 云南保山 678000; 4. 湖南中烟工业有限责任公司, 湖南长沙 410007)

摘要:为明确新鲜和腐熟水稻、油菜秸秆对酸性水稻土的改良和土壤有机碳组分含量的提升效果。将占干土质量 2% 的 4 种秸秆与酸性水稻土混合, 然后进行室内培养试验, 并在培养 0、30、60、90 d 进行取样, 测定培养试验前后土壤 pH 值、有机碳(SOC)含量和腐殖质各组分含量。随着培养的进行, 4 种秸秆的添加均显著提高了酸性水稻土的 pH 值和 SOC 含量, 添加腐熟水稻秸秆和腐熟油菜秸秆对酸性水稻土 pH 值、SOC 含量提升效果显著。与 0 d 相比, 在培养结束后, 添加 4 种秸秆均使酸性水稻土中胡敏酸(HA)含量、富里酸(FA)含量、胡富比(HA/FA)和 PQ 值不同程度的增加, 促进酸性水稻土中 HA 形成、FA 向 HA 转换。腐熟水稻秸秆的添加对 HA 形成、HM 矿化分解的促进效果最佳, 使酸性水稻土中 HA/FA 和 PQ 值分别达到最高, 腐殖化程度加深, 有利于 HA 分子向简单化方向发展。新鲜水稻秸秆的添加在促进酸性水稻土中 FA 向 HA 转化、HM 矿化分解的效果最小。腐熟油菜秸秆对改良酸性水稻土, 增加土壤有机碳组分含量, 提升土壤腐殖质品质方面具有更好的效果。

关键词:作物秸秆; 酸性土壤; pH 值; 胡敏酸; 富里酸

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)15-0225-05

水稻土是我国四大类型耕地土壤中最最为高产稳产的土壤, 同时也是受人为活动影响剧烈、土壤质量变异最为显著的土壤。1979—2017 年, 我国水稻土 pH 值平均下降了 0.26, 强酸性水稻土面积增加 28 225.62 km², 引发了土壤有机质含量下降、土壤板结、保水保肥能力差等一系列水稻土肥力退化问题^[1]。土壤酸化会使土壤微生物的活性受抑制^[2-3], 影响土壤有机质的矿化及腐殖质的形成^[4]、营养元素的转化与释放、微量元素的有效性、土壤保肥与供肥能力等^[5], 对农田土壤生产性能和农作物的生长发育产生负面影响。近年来, 由于年降水量大和化肥的过量施用, 云南保山烟稻轮作体系下的水稻土出现了不同程度的酸化问题^[6], 使得农作物生长环境条件变差, 土壤的宜种性降低。已有研

究表明, 秸秆适当还田不仅能提高土壤酸碱缓冲性能, 减缓土壤酸化的趋势, 还能改善土壤的理化性质, 提高土壤有机质和腐殖质含量, 提升腐殖质活性, 促进有机质活化, 改善腐殖质品质, 为作物生长提供养分。刘少华等的研究表明, 最适宜水稻生长的 pH 值为 6.0, pH 值 < 5.0 或 pH 值 > 8.0 时均不利于其生长^[7]。杨彩迪等研究了秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响, 结果表明水稻与油菜秸秆直接还田和炭化还田处理均可提高红壤 pH 值和有机质含量^[8]。Jin 等研究认为, 在稻麦轮作系统中, 将 1 500 ~ 4 500 kg/hm² 稻草和 2 250 ~ 6 750 kg/hm² 稻草还田, 有助于提高土壤有机碳含量; 常规秸秆还田可以在短时间内提高土壤有机碳含量; 少耕或不耕作加秸秆还田相结合, 有助于提高土壤有机碳的含量和质量^[9]。邵满娇等在等碳量的前提下, 研究了不同处理玉米秸秆对黑土腐殖质组成的影响, 结果表明, 添加秸秆和腐熟秸秆均能增加土壤有机碳含量, 改善腐殖质组成^[10]。目前, 国内外学者对秸秆还田的研究多集中在对比不同还田方式^[11]、不同还田深度^[12]对土壤物理、化学性质的影响, 然而, 对比不同秸秆对酸性水稻土 pH 值及有机碳组分影响的研究较少, 且添加秸秆后有机碳组分构成及稳定性

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 中国烟草总公司云南省公司科技计划(编号: 2021530000242013); 湖南省教育厅资助科研项目(编号: 20A230); 湖南中烟工业有限责任公司科研项目(编号: KY2020JD008)。

作者简介: 周喜新(1977—), 男, 湖南宁乡人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 从事烟草科学与工程技术研究。E-mail: 152924447@qq.com。

通信作者: 张 毅, 博士, 讲师, 从事烟草科学与工程技术研究。
E-mail: zyi1219@163.com。

仍有待深入研究。为此,本研究拟采用室内培养法,研究添加 4 种秸秆(新鲜水稻秸秆、腐熟水稻秸秆、新鲜油菜秸秆、腐熟油菜秸秆)后酸性水稻土 pH 值和有机碳含量及其组分的动态变化,以期为酸性水稻土改良及秸秆合理还田提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验于 2020 年在云南省腾冲市进行,供试土壤取自腾冲市界头镇(98. 63°E,25. 42°N),海拔为 1 620 m,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温为 15.1 ℃,年降水量为 1 479 mm,并且降水集中在每年 6—10 月。土壤类型为水稻土,种植模式为烟稻轮作,烤烟种植品种为 K326。取样深度为 0 ~ 20 cm,5 点取样,混合为 1 个样品。新鲜的土壤样品带回实验室之后,去除石粒、根系等杂物后过 5 mm 筛,分为 2 份,一份风干用于基础理化性质测定,另一份用于培养试验。供试土壤基本性质:pH 值为 4. 92,有机碳含量为 18. 70 g/kg,碱解氮含量为 169. 25 mg/kg,有效磷含量为 27. 08 mg/kg,速效钾含量为 179. 92 mg/kg,胡敏酸含量为 3. 55 g/kg,富里酸含量为 5. 98 g/kg,胡敏素含量为 10. 24 g/kg。试验所用水稻秸秆、油菜秸秆取自当地农田,将 2 种作物秸秆带回室内用蒸馏水清洗干净,放入 60 ℃烘箱中烘 72 h,粉碎后过 60 目筛。腐熟水稻秸秆、腐熟油菜秸秆由腾冲市界头烤烟生产专业合作社提供。供试秸秆基本性质见表 1。

表 1 供试秸秆基本性质

秸秆类型	碳含量 (%)	全氮含量 (%)	C/N	全磷含量 (%)	全钾含量 (%)
新鲜水稻秸秆	51. 35	1. 03	49. 85	0. 21	1. 17
腐熟水稻秸秆	37. 31	1. 67	22. 34	0. 25	1. 28
新鲜油菜秸秆	54. 04	1. 36	39. 74	0. 16	1. 12
腐熟油菜秸秆	36. 28	1. 74	20. 85	0. 19	1. 30

1.2 试验设计

针对添加秸秆的不同,设置 4 个处理,每个处理称取供试土壤 600 g,添加占干土质量 2% 的作物秸秆,同时以未添加作物秸秆的土壤作对照,分别为 CK:不添加秸秆、T1:添加 2% 新鲜水稻秸秆、T2:添加 2% 腐熟水稻秸秆、T3:添加 2% 新鲜油菜秸秆、T4:添加 2% 腐熟油菜秸秆。采用恒温恒湿培养箱(BINDERKBF240, German)于 2020 年 6 月 25 日开始进行室内培养试验,培养温度为 25 ℃,将土壤和

秸秆混合均匀后加入适量去离子水,并调节绝对含水量为 30%,用保鲜膜封口,并在其表面扎数个直径为 2 mm 的小孔以保持空气交换,每 3 ~ 5 d 添加去离子水维持土壤含水量基本恒定。所有处理均重复 3 次。

1.3 样品采集和分析方法

试验开始后,分别在培养 0、30、60、90 d 采集土壤样品,经过自然风干、粉碎后分别过 0. 25、2 mm 筛,密封保存备用。土壤 pH 值采用电位计法测定,土:水=2. 5:1. 0。土壤有机碳(SOC)含量采用油浴加热重铬酸钾氧化-容量法进行测定。腐殖质、胡敏酸(HA)、富里酸(FA)采用焦磷酸钠-氢氧化钠提取,用重铬酸钾氧化容量法测定其含量。胡敏素(HM)含量=腐殖质含量-胡敏酸含量-富里酸含量,PQ 值=HA 含量/(HA 含量+FA 含量)。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26. 0 进行统计分析,用 OriginPro 2022 绘图。处理间比较采用单因素方差分析(ANOVA),差异显著性分析采用邓肯氏(Duncan's)法,显著性水平为 0. 05。相关性分析采用皮尔逊(Pearson)相关系数和双侧显著性检验。

2 结果与分析

2.1 添加不同秸秆对酸性水稻土 pH 值的影响

添加不同秸秆对酸性水稻土 pH 值的影响效果如图 1 所示,4 种秸秆处理均显著提高了酸性水稻土的 pH 值。随着培养时间的增加,除 CK 外,添加秸秆处理的土壤 pH 值均呈现 0 ~ 30 d 上升,30 d 后逐渐下降并趋于稳定的变化趋势。培养 90 d 时,添加秸秆处理的土壤 pH 值均显著高于 CK,且添加腐熟秸秆的 T2 和 T4 处理对酸性水稻土 pH 值的提升效果优于添加新鲜秸秆的 T1、T3 处理,T1、T3 处理使土壤 pH 值分别增加至 5. 34、5. 45,相较于 CK 分别提升了 8. 83%、11. 07%;T2 和 T4 处理使土壤 pH 分别增加至 6. 04、6. 08,相较于 CK 分别提升了 23. 16%、23. 91%。表明腐熟油菜秸秆的添加对酸性水稻土 pH 值的提升效果更好。

2.2 添加不同秸秆对酸性水稻土有机碳含量的影响

添加不同秸秆对酸性水稻土 SOC 含量的影响效果如图 2 所示,4 种秸秆处理均显著提高了酸性水稻土的 SOC 含量。随着培养时间的增加,CK 和添加秸秆各处理的土壤 SOC 含量均呈现 0 ~ 30 d 上

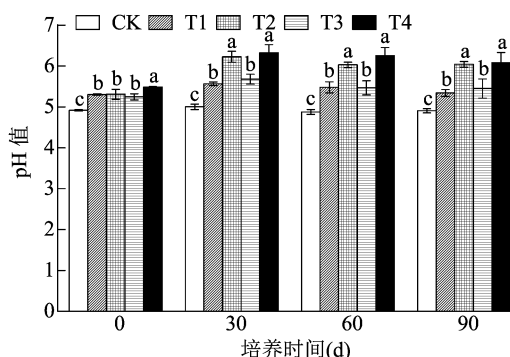


图1 不同秸秆处理下酸性稻田土壤的 pH 值

升,30 d后逐渐下降并趋于稳定的变化趋势。培养 90 d时,添加秸秆处理的土壤 SOC 含量均显著高于 CK,添加腐熟秸秆的 T2 和 T4 处理对酸性水稻土 SOC 含量的提升效果优于添加新鲜秸秆的 T1 和 T3 处理,且添加腐熟油菜秸秆的 T4 处理土壤 SOC 含量显著高于添加腐熟水稻秸秆的 T2 处理,T4 处理使土壤 SOC 含量增加至 24.92 g/kg,相较于 CK 增加了 35.09%。

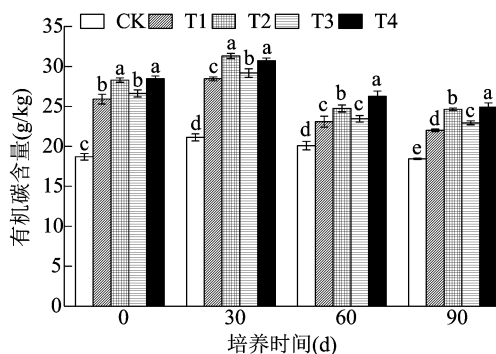


图2 不同秸秆处理下酸性稻田土壤的有机碳含量

2.3 添加不同秸秆对酸性水稻土腐殖质组分的影响

2.3.1 胡敏酸含量 添加不同秸秆对酸性水稻土 HA 含量的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着培

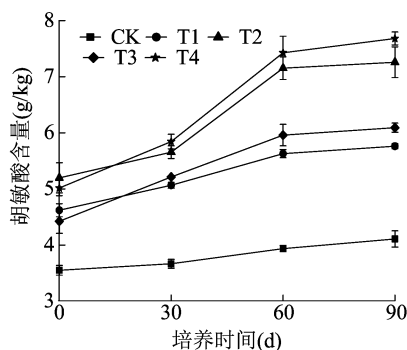


图3 添加秸秆后胡敏酸含量的变化

养时间的增加,CK 和添加秸秆处理的土壤 HA 含量均呈现逐渐增加的趋势。培养 30 d 时,添加腐熟秸秆的 T2、T4 处理对酸性水稻土 HA 含量的提升效果明显优于添加新鲜秸秆的 T1、T3 处理。培养 60 d 时,添加腐熟油菜秸秆的 T4 处理的 HA 含量最高,其次是添加腐熟水稻秸秆的 T2 处理,T4 处理比 T3 处理、T2 处理比 T1 处理的 HA 含量分别增加 24.62%、27.06%。培养 90 d 时,与 0 d 相比,添加秸秆后 T1 ~ T4 处理的 HA 含量分别增加了 24.68%、39.63%、37.69%、53.11%。可见,腐熟油菜秸秆的添加对酸性水稻土 HA 形成的促进作用最大,其次为腐熟水稻秸秆、新鲜油菜秸秆,新鲜水稻秸秆对酸性水稻土 HA 的积累作用最小。

2.3.2 富里酸含量 添加不同秸秆对酸性水稻土 FA 含量的影响如图 4 所示,随着培养时间的增加,除 CK 外,添加秸秆处理的土壤 FA 含量均呈现逐渐降低的趋势。培养 30 d 时,除 T4 处理外,添加秸秆处理的土壤 FA 含量与 0 d 时相比变化不大。培养 90 d 时,与 0 d 相比,添加秸秆后 T1 ~ T4 处理的 FA 含量分别降低了 6.04%、11.17%、7.55%、15.81%,但均高于供试原始土壤。说明,添加秸秆能显著提高酸性水稻土的 FA 含量,腐熟油菜秸秆的添加对酸性水稻土 FA 转换的促进作用最大,其次为腐熟水稻秸秆、新鲜油菜秸秆,新鲜水稻秸秆对酸性水稻土 FA 转换的促进作用最小。

2.3.3 胡敏素含量 添加不同秸秆对酸性水稻土 HM 含量的影响如图 5 所示,随着培养时间的增加,CK 和添加秸秆处理的土壤 HM 含量均呈现逐渐降低的趋势,但添加秸秆处理的土壤 HM 含量均高于供试原始土壤。培养 90 d 时,与 0 d 相比,添加秸秆后 T1 ~ T4 处理的 HM 含量分别降低了 35.09%、45.08%、40.83%、47.42%。由此说明,在促进 HM 矿化分解方面,添加腐熟油菜秸秆更具优势,其次

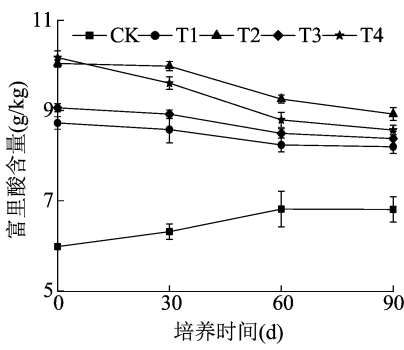


图4 添加秸秆后富里酸含量的变化

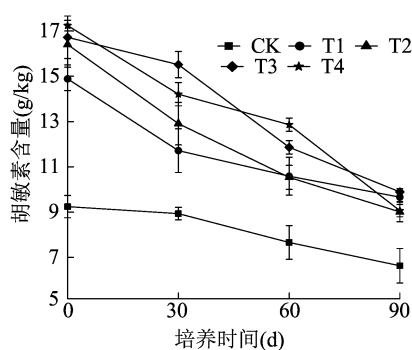


图5 添加秸秆后胡敏素含量的变化

是添加腐熟水稻秸秆和新鲜油菜秸秆,而添加新鲜水稻秸秆培养 90 d 时,酸性水稻土的 HM 含量由 14.89 g/kg 降至 9.66 g/kg,降低幅度在 4 种供试秸秆中最小。

2.4 添加不同秸秆对酸性水稻土腐殖质组成的影响

胡富比(HA/FA)和 PQ 值作为土壤腐殖化程度的重要指标,其变化如图 6 所示,随着培养时间的增加,除 CK 外,添加秸秆处理的 HA/FA 和 PQ 值均逐

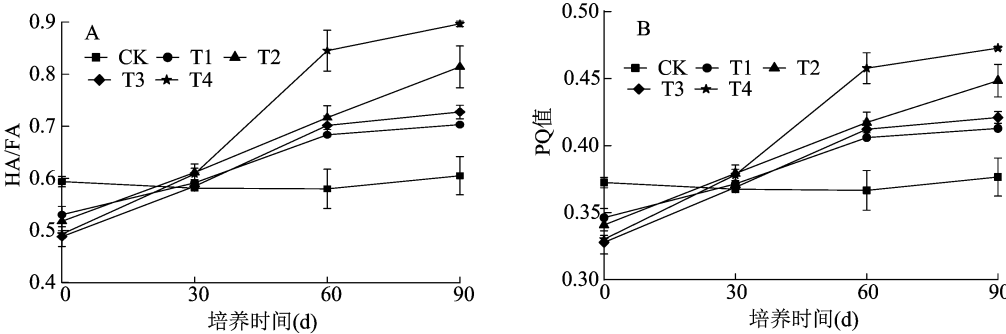


图6 添加秸秆后土壤腐殖质组成相对比例的变化趋势(HA/FA 和 PQ 值)

2.5 添加不同秸秆酸性水稻土 pH 值与土壤有机碳组分间相关性分析

由表 2 可知,添加秸秆后 90 d,酸性水稻土 pH 值与 SOC 含量、HA 含量、FA 含量、HA/FA、PQ 值间呈极显著或显著正相关关系,相关系数分别为

渐增加。培养 30 d 时,添加秸秆各处理的 HA/FA 和 PQ 值与 CK 无明显差异。培养 90 d 时,添加秸秆各处理的 HA/FA 和 PQ 值均达到最大值,与 0 d 相比,T1 ~ T4 处理的酸性水稻土的 HA/FA 分别增加了 32.64%、57.26%、49.02%、81.90%;PQ 值分别增加了 19.21%、31.58%、28.41%、43.20%,说明,在促进 FA 向 HA 转化、增加土壤腐殖化程度方面,添加腐熟油菜秸秆优势最大,其次是添加腐熟水稻秸秆和新鲜油菜秸秆,添加新鲜水稻秸秆效果最差。

0.962、0.986、0.886、0.972、0.976;酸性水稻土 SOC 含量与 HA 含量、FA 含量、HA/FA、PQ 值间呈极显著或显著正相关关系,相关系数分别为 0.989、0.966、0.943、0.959。

表 2 添加秸秆后 90 d 酸性水稻土 pH 值与土壤有机碳组分间的相关性

项目	相关系数						
	pH 值	SOC 含量	HA 含量	FA 含量	HM 含量	HA/FA	PQ 值
pH 值	1.000						
SOC 含量	0.962 **	1.000					
HA 含量	0.986 **	0.989 **	1.000				
FA 含量	0.886 *	0.966 **	0.923 *	1.000			
HM 含量	0.519	0.731	0.639	0.825	1.000		
HA/FA	0.972 **	0.943 *	0.980 **	0.828	0.524	1.000	
PQ 值	0.976 **	0.959 **	0.989 **	0.857	0.567	0.998 **	1.000

注:“**”“*”分别表示相关性在 0.01、0.05 水平上达到显著。

3 讨论

本试验结果表明,随着培养的进行,添加 4 种秸秆后,酸性水稻土 pH 值均有不同程度的提升,与 Yuan 等的研究结果^[13-14]一致。这主要是由于秸秆中含有钙、镁等多种碱性盐基离子^[15-16],秸秆进入土壤后,这些碱性盐基离子会与酸性土壤中的交换性 H⁺、Al³⁺ 等发生络合反应,降低土壤中交换性阳离子的含量,提高土壤 pH 值^[17]。在 4 种秸秆中,腐

熟油菜秸秆、腐熟水稻秸秆对酸性水稻土 pH 值的提升效果显著。秸秆经过腐熟后会产生有机阴离子,这些阴离子会与土壤铝铁氢氧化物中的 OH⁻ 发生配位交换反应,使 OH⁻ 增加,土壤 pH 值显著升高^[18]。

土壤有机质含量取决于原有有机质的矿化速率及外源有机物的补充量^[19]。培养至 90 d 时,添加 4 种秸秆处理后的酸性水稻土 SOC 含量均显著高于 CK,这与杨敏芳等的研究结果^[20]相同,说明添加秸秆产生的外源性有机碳投入是影响土壤 SOC

变化的重要因素,直接影响着土壤 SOC 积累的效果。秸秆中含有较高的有机碳,进入土壤腐解后,促进土壤微生物繁殖,进而推动秸秆中的有机碳转化为土壤 SOC^[21]。在 4 种秸秆中,腐熟油菜秸秆、腐熟水稻秸秆对酸性水稻土 SOC 含量的提升效果显著。秸秆经过腐熟后,促进了秸秆中不易分解的纤维素、半纤维素等成分快速腐解^[22],从而有效提升了土壤 SOC 含量。此外,C/N 是影响秸秆腐解速率的重要因素。C/N 比大,有机质部分难分解,微生物利用困难,秸秆腐解缓慢。一般认为秸秆腐解的最适 C/N 在 20 ~ 30 之间^[23],秸秆经过腐熟后,C/N 降低,腐熟水稻秸秆的 C/N 为 22.34,腐熟油菜秸秆的 C/N 为 20.85,更有利于微生物利用分解。

土壤腐殖质被认为是健康肥沃土壤最重要的组成部分^[24-25]。HA 作为腐殖质中最活跃的组分,在一定程度上可表征腐殖质的芳香性、化学稳定性和有效性。添加 4 种秸秆均可有效增加酸性水稻土的 HA、FA 含量,这与 Fan 等研究秸秆与土壤均匀混合后使腐殖质组成中 HA、FA 含量提升显著的试验结果^[26]相一致。Pearson 相关性分析结果表明,HA、FA、HM 含量三者中除 HM 含量与 SOC 含量之间相关性不显著外,HA、FA 含量与 SOC 含量均呈极显著正相关关系。这说明添加秸秆促使土壤中 FA 向 HA 转化,有利于 HA 的积累和土壤 SOC 的保存。培养 90 d 时,与 0 d 相比,添加秸秆后 T1 ~ T4 处理 HA 含量分别增加了 24.68%、39.63%、37.69%、53.11%。由此可见,添加油菜秸秆的 T3 和 T4 处理对酸性水稻土 HA 形成的促进效果优于添加水稻秸秆的 T1 和 T2 处理,这可能与不同作物秸秆腐解特性不同有关。代文才等指出,水稻秸秆快速腐解期为 0 ~ 60 d,而油菜秸秆快速腐解期为 0 ~ 30 d,在试验结束时秸秆累计腐解率表现为油菜秸秆(75.80%) > 水稻秸秆(74.23%),这可能与秸秆的组织结构不同有关^[27]。在 4 种秸秆中,腐熟水稻秸秆和腐熟油菜秸秆的添加对酸性水稻土 HA 形成的促进作用最大,这可能是因为秸秆经过腐熟后,秸秆中的木质素以及一些分解的中间产物在微生物和酶的作用下合成了 HA 和 FA,进入土壤后有利于土壤 HA 和 FA 含量的增加,并且土壤微生物会不断分解并利用分子结构简单、活性强的 FA 组分中的氨基酸等含氮化合物,向 HA 转化^[28],从而使 HA 含量随着培养时间的增加而逐渐提升,FA 含量随着培养时间的增加而逐渐下降。

FA 是 HA 形成的前体物质,HA/FA 和 PQ 值可用于描述两者之间转化的速率,能有效评价土壤腐殖化程度、衡量土壤腐殖质品质的优劣^[29]。随着培养时间的增加,添加 4 种秸秆的酸性水稻土的 HA/FA、PQ 值逐渐增加,这与刘军等研究长期施用秸秆可以提高连作棉田土壤 HA/FA 的试验结果^[30]一致。说明秸秆的添加能够为微生物参与腐殖化进程提供丰富的营养基质,推动 FA 向 HA 转化,使 HA 得以积累,HA 组分的占比增加,腐殖化程度加深,促进土壤腐殖质更新和积累,从而使得土壤腐殖质的品质得到改善。朱青藤等的研究结果也表明,施加秸秆使得 HA 分子缩合度和芳香性下降,脂族性增强,有利于 HA 分子向简单化方向发展^[31]。一般认为,初度熟化的土壤 HA/FA 为 0.2 ~ 0.3,中度熟化的土壤 HA/FA 为 0.5 左右,高度熟化的土壤 HA/FA 可达 1.4 左右^[32]。本试验中,T1 ~ T4 处理酸性水稻土的 HA/FA 分别为 0.53 ~ 0.70、0.52 ~ 0.81、0.49 ~ 0.73、0.49 ~ 0.90。由此可见,添加腐熟秸秆处理的土壤熟化度相对较高。

HM 是腐殖质中的惰性物质,具有比 HA 和 FA 更大的分子量和更高的聚合度,其在腐殖质中占比最大^[33]。Li 等的研究表明,较大数量的有机物料与化肥配施能够加速土壤稳定性碳的矿化^[34]。在本试验中,培养 90 d 时,与 0 d 相比,添加秸秆后 T1 ~ T4 处理的 HM 含量分别降低了 35.09%、45.08%、40.83%、47.42%。由此可见,4 种秸秆的添加均促进了 HM 矿化分解,但腐熟油菜秸秆更具优势,其次是腐熟水稻秸秆。

4 结论

(1)随着培养的进行,4 种秸秆的添加均显著提高了酸性水稻土的 pH 值和 SOC 含量,添加腐熟水稻秸秆和腐熟油菜秸秆对酸性水稻土 pH 值、SOC 含量提升效果显著。

(2)4 种秸秆的添加均可有效增加酸性水稻土中 HA、FA 的含量,其中腐熟油菜秸秆对于酸性水稻土中 HA 形成、FA 向 HA 转换的促进作用最大,其次是腐熟水稻秸秆、新鲜油菜秸秆,新鲜水稻秸秆对酸性水稻土中 HA 形成、FA 向 HA 转换的促进作用最小。

(3)与 0 d 相比,在培养结束时,添加 4 种秸秆均使酸性水稻土 HA/FA 和 PQ 值有不同程度的增加,其中腐熟油菜秸秆处理使酸性水稻土 HA/FA

和 PQ 值分别达到最高,土壤熟化度相对较高,腐殖化程度加深,有利于 HA 分子向简单化方向发展,使得土壤腐殖质年轻化。

(4)历经 90 d 的培养,4 种秸秆的添加使酸性水稻土中 HM 含量均有不同程度降低。在促进 HM 矿化分解方面,腐熟油菜秸秆更有优势。

参考文献:

- [1]叶英聪,孙波,刘绍贵,等. 中国水稻土酸化时空变化特征及其对氮素盈余的响应[J]. 农业机械学报,2021,52(2):246–256.
- [2]Meng C, Tian D S, Zeng H, et al. Global soil acidification impacts on belowground processes [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(7):074003.
- [3]Steven B, LaReau J C, Taerum S J, et al. What's under the christmas tree? A soil sulfur amendment lowers soil pH and alters fir tree rhizosphere bacterial and eukaryotic communities, their interactions, and functional traits [J]. *Microbiology Spectrum*, 2021, 9(1):e0016621.
- [4]周娟,袁珍贵,郭莉莉,等. 土壤酸化对作物生长发育的影响及改良措施[J]. 作物研究,2013,27(1):96–102.
- [5]郭荣荣,黄凡,易晓媚,等. 混合无机改良剂对酸性多重金属污染土壤的改良效应[J]. 农业环境科学学报,2015,34(4):686–694.
- [6]刘浩. 保山烟区植烟土壤酸化状况和成因分析及改良方法对烤烟品质的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2016.
- [7]刘少华,陈国祥,吕川根,等. 根际 pH 值对杂交稻幼苗光能转化特性的影响[J]. 中国水稻科学,2003,17(3):244–248.
- [8]杨彩迪,卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响[J]. 环境科学,2020,41(9):4246–4252.
- [9]Jin Z Q, Shah T, Zhang L, et al. Effect of straw returning on soil organic carbon in rice – wheat rotation system; a review [J]. *Food and Energy Security*, 2020, 9(2):e200.
- [10]邵满娇,窦森,谢祖彬. 等碳量玉米秸秆及其腐解、炭化材料还田对黑土腐殖质的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(10):2202–2209.
- [11]田慎重,宁堂原,王瑜,等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(2):373–378.
- [12]矫丽娜,李志洪,殷程程,等. 秸秆还田深度对黑土腐殖质和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(2):17–21.
- [13]Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):3488–3497.
- [14]曲晓晶,孙大雁,吴南,等. 添加剂对不同还田深度秸秆腐解及周际土壤环境的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(2):261–268.
- [15]Xu R K, Coventry D R. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red – brown earth soil [J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(1):113–119.
- [16]Wang L, Butterly C R, Tian W, et al. Effects of fertilization practices on aluminum fractions and species in a wheat soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(7):1933–1943.
- [17]Tang C X, Weligama C, Sale P. Subsurface soil acidification in farming systems: its possible causes and management options [M]// Xu J, Sparks D. *Molecular environmental soil science*. Dordrecht: Springer, 2013:389–412.
- [18]董文,张青,罗涛,等. 不同有机肥连续施用对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报,2020,36(28):106–110.
- [19]陈国徽,赵小敏,谢国强,等. 油稻轮作下秸秆还田对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 江西农业大学学报,2022,44(4):813–824.
- [20]杨敏芳,朱利群,韩新忠,等. 不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J]. 应用生态学报,2013,24(5):1387–1393.
- [21]Fan W, Wu J G. Short – term effects of returning granulated straw on soil microbial community and organic carbon fractions in dryland farming [J]. *Journal of Microbiology*, 2020, 58(8):657–667.
- [22]赵懿,杜建军,张振华,等. 秸秆还田方式对土壤有机质积累与转化影响的研究进展[J]. 江苏农业学报,2021,37(6):1614–1622.
- [23]石琳,金梦灿,单旭东,等. 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(2):277–285.
- [24]潘占东,马倩倩,陈晓龙,等. 添加生物质炭对黄土高原旱作农田土壤养分、腐殖质及其组分的影响[J]. 草业学报,2022,31(2):14–24.
- [25]张伟彬. 有机肥和化肥配施对小麦甘薯轮作土壤腐殖质结合形态及微生物群落结构的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):247–252.
- [26]Fan W, Wu J G, Li J M, et al. Comparative effects of different maize straw returning modes on soil humus composition and humic acid structural characteristics in Northeast China [J]. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(4):355–370.
- [27]代文才,高明,兰木玲,等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报,2017,25(2):188–199.
- [28]褚慧,宗良纲,汪张懿,等. 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化[J]. 土壤学报,2013,50(5):931–939.
- [29]李春阳,王海江,蒋秀芝. 不同种类有机物料等碳量输入对白浆土腐殖质组成的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(4):19–25.
- [30]刘军,景峰,李同花,等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤腐殖质组分含量的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(2):293–302.
- [31]朱青藤,申连玉,钱黎慧,等. 有机物料对白土土壤胡敏酸结构特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):396–403.
- [32]古小治,章钢娅,俞元春,等. 滨海水稻土腐殖质的组成及随种稻时间演变的研究初报[J]. 土壤学报,2008,45(4):635–640.
- [33]王维,吴景贵,李蕴慧,等. 有机物料对不同作物根系土壤腐殖质组成和结构的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(2):215–220.
- [34]Li L J, Han X Z. Changes of soil properties and carbon fractions after long – term application of organic amendments in Mollisols [J]. *Catena*, 2016, 143:140–144.