doi：10.11838/sfsc.1673-6257.21606

烟秆炭和有机肥配施对土壤主要养分及腐殖物质的影响

林　瑛[1]，何洁雯[2]，陈星峰[3]，曾文龙[4]，熊德中[2]，蔡海洋[2*]

（1. 福建林业职业技术学院，福建　南平　353000；2. 福建农林大学资源与环境学院，福建　福州　350002；3. 福建省烟草质量监督检测站，福建　福州　350001；4. 福建省烟草公司龙岩市公司，福建　龙岩　364000）

摘　要：为探究烟秆炭有机肥对土壤主要养分及腐殖物质的影响，通过室内土壤培育试验研究了单施有机肥、烟秆炭有机肥、单施烟秆炭对土壤主要养分及腐殖物质的影响。试验设置了 8 个处理，分别为对照（CK，单施有机肥），烟秆炭占有机肥比例为 10%（B10）、20%（B20）、40%（B40）、60%（B60），单施烟秆炭 100%（B100）、1/2 量烟秆炭（BH）、1/4 量烟秆炭（B2H）。结果表明：（1）与对照相比，烟秆炭有效地促进了土壤 pH 提升，以及土壤速效钾、全碳、全氮的含量，其中 B100 处理的速效钾和全碳含量的增幅分别为 55.1%、132.1%。土壤有效磷含量总体上随烟秆炭量的增加而提升，但烟秆炭有机肥比单施烟秆炭提升效果好，以 B60 处理达最大（72.69 mg・kg^{-1}），B100 处理次之（46.76 mg・kg^{-1}）。而烟秆炭降低了土壤碱解氮含量，B100 处理最低，较对照降低了 21.3%。（2）烟秆炭能增加土壤交换性钙、交换性镁含量，随培育时间的延长，添加了烟秆炭的处理比单施有机肥提升效果更稳定。（3）烟秆炭明显增加了土壤有机碳和胡敏素含量。B100 处理与对照相比，有机碳提升了 68.6%，胡敏素增加了 147.8%。在 B10 ~ B60 处理中随烟秆炭比例的增加，土壤胡敏酸含量下降；在 B2H ~ B100 处理中随单施炭量增多，土壤胡敏酸含量则略有提升。土壤富里酸含量则以烟秆炭量最多的 B100 处理最低。总体看来，在施肥量相同的情况下，有机肥有利于土壤碱解氮提升，促进土壤胡敏酸、富里酸的形成。烟秆炭有利于土壤碳、全氮、速效钾、有效磷、交换性镁的增加。结合各项分析，含 60% 烟秆炭的有机肥（B60）处理既有利于土壤主要养分的提升，又有利于土壤腐殖物质的形成。

关键词：烟秆炭有机肥；土壤养分；腐殖物质

福建省是中国优质烤烟的重要生产基地。近年来，福建省的烟草种植面积约有 66666.7hm^2，烟叶产量约 15 万 t，按照烟叶与烟秆比 1∶1 计算[1]，每年会产生约 15 万 t 的废弃烟秆，而大量烟秆在烟田中堆放则会造成土壤病虫害加重与环境污染等问题[2]。因此，提升烟秆废弃物的资源化利用，对保护烟田生态环境、土壤培肥等具有重要意义。

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标，并且土壤肥力状况与有机质含量及其组成相关[3]。土壤腐殖质作为土壤有机质的重要组成部分，占土壤有机质的 60% ~ 80%[4]，是有机物质在土壤中经分解再合成的高分子有机化合物[5]，有利于土壤肥力的提升。因此，提高土壤有机质（腐殖质）对改善土壤肥力有着重要意义。

目前，将农作物秸秆在高温限氧的情况下热解炭化产生的生物质炭已得到了广泛应用[2]。生物质炭不仅可以改善土壤保肥能力，还可以提高土壤有机质含量[6]。生物质炭和有机肥均可不同程度地提升土壤有机质含量[7]。将生物质炭与有机肥结合施用，有机肥可弥补生物质炭自身养分不足的缺点，而生物质炭则可以促进有机肥持久保持肥效[8]。但具体效果与生物质炭和有机肥的种类、以及两者的结合比例等都有关系[9]。目前，关于烟秆炭与有机肥混施对土壤肥力影响的研究较少。为此，选取烟秆制成生物质炭，并与常规有机肥配合作为试验材料，通过室内土壤培育试验，探究烟秆炭有机肥对土壤主要养分以及腐殖物质的影响，为废弃烟秆绿色转化以及科学施用烟秆炭有机肥提供依据。

收稿日期：2021-11-10；**录用日期：**2022-01-23

基金项目：中国烟草总公司福建省公司科技计划项目（2019350000240149）；福建省烟草公司龙岩市公司项目（2019350800240039）。

作者简介：林瑛（1993-），硕士研究生，研究方向为农业资源利用。E-mail：1413687113@qq.com。

通讯作者：蔡海洋，E-mail：79371388@qq.com。

1　材料与方法

1.1　试验时间、地点与材料

土壤培育试验于2019年8月到2020年9月在福建农林大学实验室内进行，供试土壤采集于福州市闽侯县白沙镇溪头村，土壤类型为黄泥田，前作水稻，水稻收割后采集耕作层土壤。土样风干后，过2 mm筛用于土壤培育试验。取部分土壤用于测定土壤基本理化性质，土壤基本性状见表1。试验用的烟秆炭及有机肥由福建省烟草公司龙岩市公司烟科分所提供。烟秆炭的全碳为699.91 g·kg^{-1}，全氮为27.18 g·kg^{-1}，pH为8.95。有机肥为龙岩烤烟专用有机肥，其有机质含量为710.44 g·kg^{-1}，全氮为20.30 g·kg^{-1}，全磷（P_2O_5）为11.20 g·kg^{-1}，全钾（K_2O）为23.00 g·kg^{-1}，pH为6.96。

表1　供试土壤的基本理化性质

pH	有效磷（mg·kg^{-1}）	速效钾（mg·kg^{-1}）	碱解氮（mg·kg^{-1}）	有机碳（g·kg^{-1}）	全碳（g·kg^{-1}）	全氮（g·kg^{-1}）
4.42	6.73	108.23	74.32	10.39	11.14	1.01

1.2　试验方法

试验设置8个处理，将烟秆炭与有机肥按不同比例混合成为烟秆炭有机肥。8个处理具体要求如表2。每个处理设置3个重复，每个重复土壤为2 kg，将土和烟秆炭有机肥按不同处理要求充分混合均匀后，装入盆中。整个培育过程保持土壤水分为田间持水量的70%，用称重法每隔5 d调节水分。分别于培育200、400 d时取样，进行土壤相关性状的测定。

表2　烟秆炭有机肥的配施比例及用量

处理	比例	用量（g·kg^{-1}）
CK	0%烟秆炭+100%有机肥	15
B10	10%烟秆炭+90%有机肥	15
B20	20%烟秆炭+80%有机肥	15
B40	40%烟秆炭+60%有机肥	15
B60	60%烟秆炭+40%有机肥	15
B100	100%烟秆炭+0%有机肥	15
BH	100%烟秆炭+0%有机肥	7.5（即1/2量）
B2H	100%烟秆炭+0%有机肥	3.75（即1/4量）

1.3　测定项目与方法

土壤性状测定项目：pH值采用电位法，水土比为5∶1；碱解氮用碱解扩散法；有效磷用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$—分光光度法；速效钾用NH_4OAc–火焰光度法；全氮、全碳用高精度碳氮分析仪测定（LECO/力可）；交换性钙、镁用乙酸铵交换–原子吸收光谱法（PinAAcle 900F）；有机碳用重铬酸钾容量法–外加热法；土壤腐殖物质组成采用焦磷酸钠–氢氧化钠提取重铬酸钾氧化容量法。

1.4　数据处理与分析

数据处理采用Excel 2010，统计分析采用SPSS 12.0，作图采用Origion 2018。

2　结果与分析

2.1　土壤pH及碳、氮、磷、钾含量的变化

施用烟秆炭有机肥对土壤主要理化性质的影响如表3所示。在培育200 d时，与对照相比，烟秆炭单施或与有机肥配施均显著地提高了土壤pH，且随烟秆炭量的增加效果越明显。在B10～B40处理之间，土壤pH差异不显著，与对照相比，增加幅度在5.6%～7.5%。而BH和B2H处理的土壤pH与对照相比增加幅度在13.3%～7.9%。在培育400 d时，各处理的土壤pH值比200 d时有所下降，但各处理间的变化趋势与200 d时相似。说明烟秆炭对于改良土壤酸度具有明显效果，且单施烟秆炭比烟秆炭与有机肥配施效果更显著。

培育200 d时，随烟秆炭量的增多，土壤有效磷逐渐增加，但含60%烟秆炭的有机肥（B60处理）的土壤有效磷含量为最高（55.40 mg·kg^{-1}），较对照增加了77.5%。培育400 d后各处理的土壤有效磷含量变化趋势与培育200 d时相似，除B10、BH和B2H外，其他处理的土壤有效磷含量有较明显的上升，尤其是B40处理从200 d时的31.78 mg·kg^{-1}增加到400 d的72.11 mg·kg^{-1}，与最高的B60处理（72.69 mg·kg^{-1}）非常接近，这可能是因为足够量的烟秆炭与有机肥配施可以更加持久地保持肥效。

烟秆炭在整个土壤培育期均有效增加了土壤速效钾含量。除B2H处理外，各处理与对照相比均有显著提升，且随着烟秆炭量的增加效果越明显。培育200 d时，B100处理的土壤速效钾含量最大，达到317.56 mg·kg^{-1}，与对照相比增幅为53.6%。

B2H 处理土壤速效钾含量为 169.01 mg・kg^{-1}，与对照相比降低了 18.3%。培育 400 d 后各处理的土壤速效钾含量与培育 200 d 时略有下降，但 B100 处理依然为最高、B2H 处理最低。

在相同施肥量情况下，随烟秆炭比例的增加土壤碱解氮含量逐渐减少。培育 200 d 时，与对照相比，B10 ~ B60 处理的土壤碱解氮含量降低幅度为 4.1% ~ 20.1%。而单施烟秆炭 B100 ~ B2H 处理的土壤碱解氮含量相比对照下降了 20.8% ~ 8.1%，其中 B100 处理下降幅度最大。由此说明，与有机肥相比，烟秆炭不利于土壤碱解氮含量的积累，且烟秆炭越降低效果越显著。培育 400 d 时，各处理的土壤碱解氮含量比培育 200 d 时整体有所下降。以上结果表明，烟秆炭有机肥对土壤碱解氮含量的保持效果较单施烟秆炭更好。

土壤全碳由有机碳和无机碳组成，无机碳的主要成分是碳酸盐，包括原生碳酸盐和次生碳酸盐[10]。有研究指出，土壤酸化会促进土壤碳酸盐溶解[11]。而另一方面，施肥可影响次生碳酸盐的形成和转化，有机和无机肥料的使用对土壤碳酸盐的形成有很强的促进作用[12-13]。此外，Liu 等[14]研究表示，土壤微生物可通过生物矿化直接参与固定大气中的 CO_2 形成碳酸盐，施肥供应的基质可增强土壤微生物活性，进而促进土壤碳酸盐沉淀。所以，供试土壤的全碳含量比有机碳略高。培育 200 d 时，土壤全碳含量从 B10 处理的 13.37 g・kg^{-1} 上升到 B100 处理的 26.00 g・kg^{-1}，与对照相比，上升幅度为 10.4% ~ 114.7%。BH、B2H 处理相比对照土壤全碳含量上升幅度分别为 74.3%、28.5%。培育 400 d 时，除 CK、BH、B2H 的土壤全碳含量相比培育 200 d 时有所下降，其余处理均随培育时间的延长，全碳含量有所上升。由此说明，烟秆炭可以稳定持久地提升土壤全碳含量。

与对照相比，施入烟秆炭增加了土壤全氮含量。在培育 200 d 时，除 B10 处理比对照略低（下降了 0.8%）外，其余处理都有效地增加了土壤全氮含量。土壤全氮含量最高的是 B100 处理（1.56 g・kg^{-1}），B60 处理次之（1.55 g・kg^{-1}）。在培育 400 d 时，CK 和 B60 处理与培育 200 d 时相近，BH 和 B2H 处理的土壤全氮含量下降，其余处理均比培育 200 d 时有所增加。结果表明，在施肥量相同的情况下，烟秆炭有机肥或烟秆炭有利于土壤全氮含量的提升与稳定。

表 3　施用烟秆炭有机肥 200、400 d 后对土壤主要理化性质的影响

培育时间（d）	处理	pH	有效磷（mg・kg^{-1}）	速效钾（mg・kg^{-1}）	碱解氮（mg・kg^{-1}）	全碳（g・kg^{-1}）	全氮（g・kg^{-1}）
200	CK	4.83d	31.21ab	206.82f	123.72a	12.11g	1.17f
	B10	5.11c	34.09ab	220.33e	118.68ab	13.37f	1.16f
	B20	5.10c	30.06ab	237.88d	109.20bc	15.48e	1.30d
	B40	5.19c	31.78ab	250.04c	103.57bc	17.87d	1.33d
	B60	5.35b	55.40a	279.75b	98.83c	21.63b	1.55b
	B100	5.56a	35.24ab	317.56a	97.94c	26.00a	1.56a
	BH	5.47ab	26.60ab	224.38e	113.64ab	21.11c	1.42c
	B2H	5.21bc	13.82b	169.01g	110.38b	15.57e	1.24e
400	CK	4.81d	39.27ab	198.72f	113.48a	12.02g	1.17d
	B10	4.82d	34.09ab	214.92e	111.62ab	14.01f	1.22d
	B20	4.89cd	43.69ab	223.03d	104.17bc	15.74d	1.29c
	B40	4.97c	72.11a	243.29c	96.39cd	19.37c	1.38c
	B60	5.08b	72.69a	267.59b	94.53d	23.71b	1.55b
	B100	5.36a	46.76ab	308.11a	89.29d	27.90a	1.62a
	BH	5.13b	24.29b	218.98de	94.87d	19.17c	1.31cd
	B2H	4.95c	12.62b	167.66g	90.64d	14.89e	1.17d

注：同一列中不同小写字母代表同一时间不同处理间差异显著（P<0.05）。

2.2　土壤交换性钙、镁的变化

烟秆炭有机肥输入土壤200、400 d后土壤交换性钙的变化如图1。培育200 d时，在施肥量相同的CK ~ B100处理之间，土壤交换性钙含量水平相近，无显著差异，以B100处理的土壤交换性钙含量最高（590.80 mg・kg^{-1}）。1/2和1/4量烟秆炭的BH、B2H处理的土壤交换性钙含量相近，但较B100处理显著降低。培育400 d时，各处理的土壤交换性钙含量均低于培育200 d，对照从537.60 mg・kg^{-1}下降到462.13 mg・kg^{-1}，下降幅度（14%）最大。由此说明，从交换性钙养分提升和持久稳定效果来看，烟秆炭或烟秆炭有机肥比单施有机肥更好。

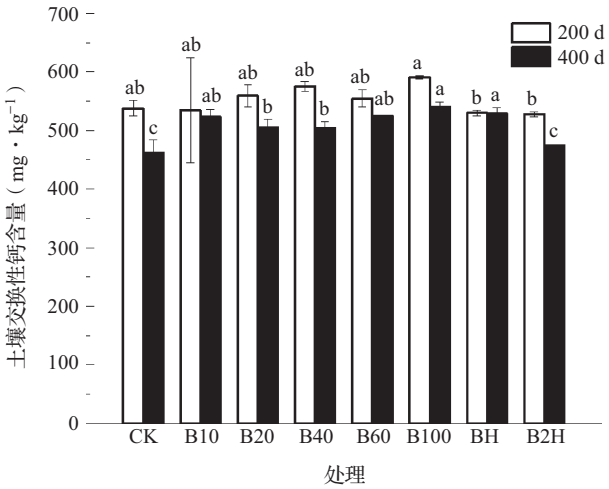

图1　烟秆炭有机肥对土壤交换性钙含量的影响

注：同一颜色柱上不同小写字母代表同一时间不同处理间差异显著（P<0.05），下同。

烟秆炭有机肥输入土壤200、400 d后土壤交换性镁的变化如图2。培育200 d时，B100处理的土壤交换性镁含量最大（77.60 mg・kg^{-1}）。在施肥量相同的CK ~ B100处理间土壤交换性镁含量未随着烟秆炭比例的上升而有规律地递增。但在B100 ~ B2H处理间，土壤交换性镁含量随烟秆炭量递减而呈梯度显著降低。培育400 d时，各处理的土壤交换性镁含量比200 d时均有下降，其中，对照的下降幅度（21%）最大。B60与B100处理的土壤交换性镁含量相近。说明，随着培育时间的延长土壤交换性镁含量下降，而足够量的烟秆炭单施或与有机肥配施（B100、B60处理）可以长久有效地提升土壤交换性镁含量。

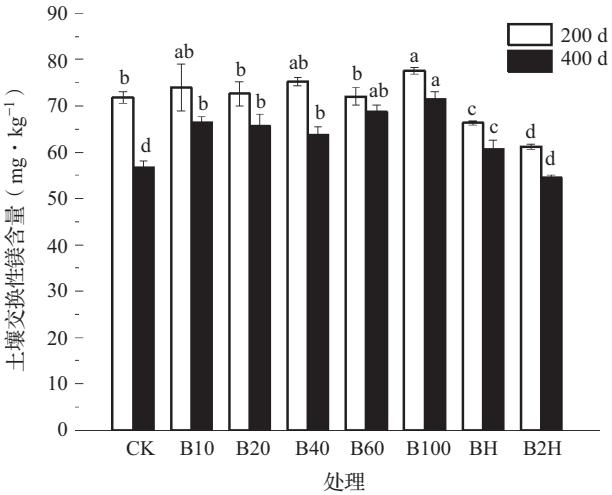

图2　烟秆炭有机肥对土壤交换性镁含量的影响

2.3　土壤有机碳及腐殖物质组成含量的变化

在培育200和400 d后，土壤有机碳含量发生了明显的变化（图3）。培育200 d时，相比对照，烟秆炭有机肥B10 ~ B60处理的土壤有机碳含量上升幅度为1.9% ~ 57.3%，B100 ~ B2H处理的土壤有机碳含量上升幅度为85.8% ~ 39.0%。说明烟秆炭量越多，土壤有机碳含量上升越显著。与培育200 d相比，培育400 d的CK ~ B20处理的土壤有机碳含量有所上升，其余处理均有下降，尤其是BH、B2H处理，分别较200 d时下降了21.7%、17.8%。以上结果表明，在施肥量相同情况下，单施烟秆炭处理的土壤有机碳含量提升效果最显著，但烟秆炭有机肥对维持土壤有机碳含量效果更好。

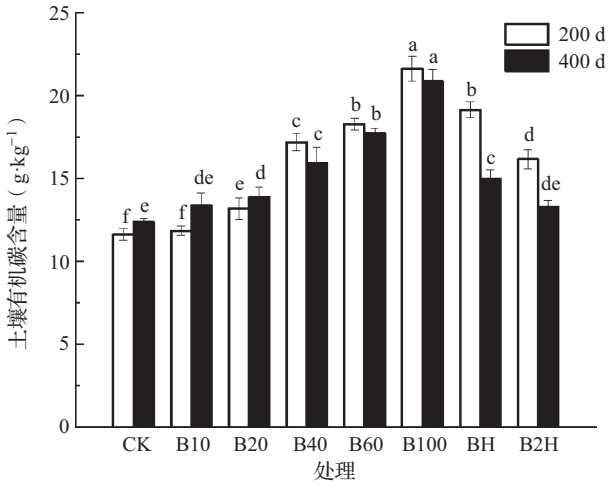

图3　烟秆炭有机肥对土壤有机碳含量的影响

土壤胡敏酸含量在培养第 200 和 400 d 时的变化如图 4。土壤胡敏酸的变化趋势与土壤有机碳不同。与对照相比，烟秆炭有机肥 B10 ~ B60 处理分别降低了 7.3% ~ 24.7%，随烟秆炭比例增加而递减。单施烟秆炭 B100 ~ B2H 处理比对照降低 35.4% ~ 44.5%，随烟秆炭量递减而土壤胡敏酸含量递减。由此说明有机肥、烟秆炭均可以提升土壤胡敏酸含量，但有机肥效果更显著。培育 400 d 时，土壤胡敏酸含量较 200 d 有所增加，尤其是单施烟秆炭 B100 ~ B2H 处理，说明烟秆炭更有利于土壤胡敏酸含量的长期积累。

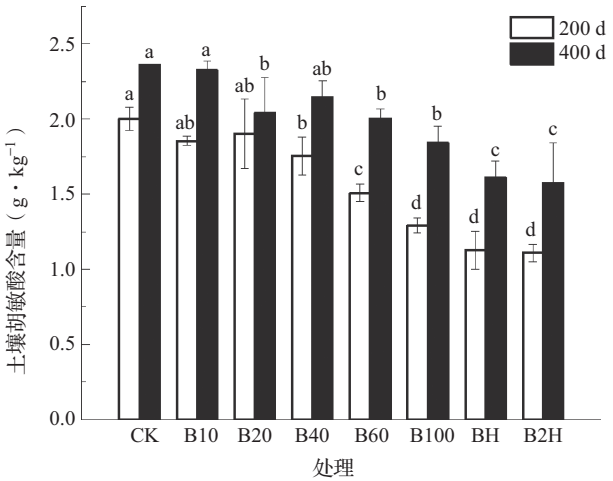

图 4　烟秆炭有机肥对土壤胡敏酸含量的影响

烟秆炭有机肥输入土壤 200、400 d 后胡敏素含量的变化如图 5。由图 5 可知，烟秆炭可以有效地增加土壤胡敏素含量。培育 200 d 时，B100 处理的土壤胡敏素含量最高（16.73 g · kg^{-1}），对照最低（5.14 g · kg^{-1}）。B10 ~ B60 处理较对照上升幅度为 17% ~ 149%。B100 ~ B2H 处理较对照上升幅度为 225.5% ~ 120.2%。由此说明，单施烟秆炭对土壤胡敏素的提升效果更快且更显著。随培育时间的延长，CK、B10、B20 处理的土壤胡敏素均有上升，而含烟秆炭量较多的 B40 ~ B2H 处理较 200 d 时更低，且 BH、B2H 处理的下降幅度最大。以上结果表明，单施烟秆炭虽然对土壤胡敏素的提升较快，但持久稳定性不如足够量的有机肥配施烟秆炭。

土壤富里酸在培育第 200、400 d 之后的变化如图 6。随着烟秆炭量的增加，土壤富里酸含量的值并没有明显变化规律。但添加有机肥的处理（CK ~ B60）其土壤富里酸含量整体高于未添加有机肥的处理（B100 ~ B2H），且含炭量最多的 B100 处理为最低。培育 200、400 d 时，土壤富里酸含量最高的分别是对照（4.50 g · kg^{-1}）、B20 处理（3.62 g · kg^{-1}），说明有机肥或烟秆炭有机肥比单施烟秆炭更有利于土壤富里酸含量的积累与稳定。

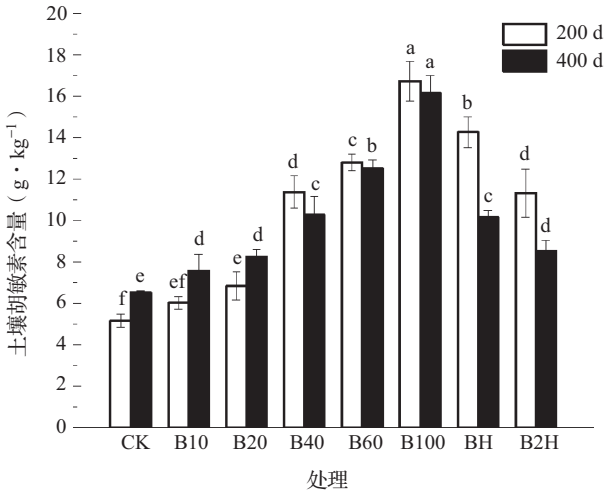

图 5　烟秆炭有机肥对土壤胡敏素含量的影响

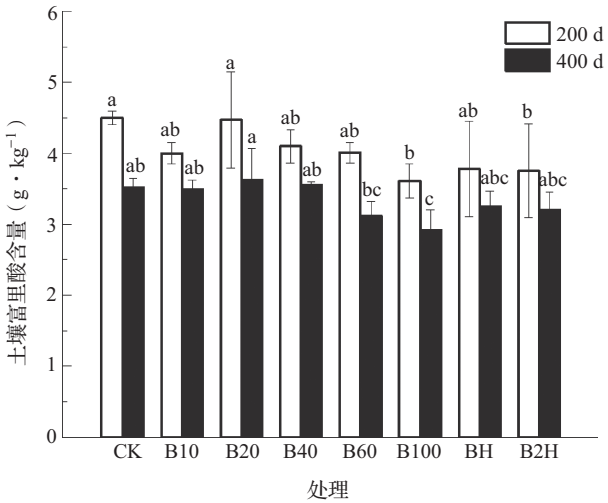

图 6　烟秆炭有机肥对土壤富里酸含量的影响

3　讨论

3.1　烟秆炭有机肥对土壤主要理化性质的影响

据曹志洪[9]研究，只有在贫瘠的土壤上，单施生物质炭才可能达到一定效果。并且生物质炭与有机肥配施比单施有机肥效果更好，学界认为其机理是生物质炭具有一系列物理、化学、生物学特性，使其具有调节土壤酸度和土壤有机质风化率；改善土壤保肥能力；为土壤微生物提供优良居所，提升土壤固氮能力；增加土壤磷钾含量、促进土壤磷有效性等功效[15-20]。但因生物质炭的吸附能力

和多孔结构等特性，施用生物质炭会对土壤的一些元素有负面影响，而有机肥与生物质炭存在养分互补的作用[21-22]。因此，不同程度地添加生物质炭和有机肥，其对土壤的影响也不尽相同。

本研究显示，土壤pH、碱解氮、有效磷、速效钾、全碳、全氮含量的变化均与烟秆炭的添加量有关。其中土壤pH、速效钾、全碳、全氮含量与烟秆炭施用量呈正比，这与Cheng等[23]的研究结果一致。生物质炭本身呈碱性，对碱性土壤pH的改良效果不显著，但对酸性土壤则相反，其主要与生物质炭能降低土壤Al^{3+}水平以及中和土壤H^+有关[24-25]。生物质炭能显著提升土壤速效钾含量，这可能有以下原因：一是其表面含有丰富的含氧官能团，从而提高土壤阳离子交换量，进而增加了土壤速效钾含量[26]，二是生物质炭本身含有一定量的钾元素[27-28]，三是生物质炭的多孔结构增加了微生物活性，从而促进了钾的积累[2]。从提升效果来看，土壤全碳效果最明显，这是由于生物质炭本身就是高碳量的有机材料[29]，可直接增加土壤碳量[30]，并且生物质炭的吸附作用也减少了土壤碳的分解[31]。其次，生物质炭在制备过程中会形成碱性物质碳酸盐，其主要存在于生物质炭制备过程中形成的灰分中[32]。另外，由于生物质炭可以改变土壤氮素的持留、转化及循环，从而提高了土壤全氮含量[33]。

土壤有效磷含量随烟秆炭量的增加而提升，这与Laird等[34]的研究结果一致。但单施烟秆炭处理的土壤有效磷含量均低于含60%烟秆炭的有机肥（B60）处理，这可能是因为有机肥和生物质炭自身都带有矿质营养（氮、磷、钾等）[27-28，35-37]，施入土壤可不同程度地提升土壤有效磷含量。有机肥与生物质炭配施提高了保肥效果[38]，因此适量的有机肥与生物质炭配施对土壤有效磷的提升效果较单施生物质炭好。陈丽美等[38]研究得出，生物质炭配施中量有机肥对土壤有效磷的提升效果最好。张影等[22]研究表明，有机物料可以增加土壤有效磷含量，但生物质炭与有机肥配施效果最优。

在施肥量相同的条件下，各处理的土壤碱解氮含量与烟秆炭量总体呈负相关，单施有机肥处理的土壤碱解氮含量为最高，单施烟秆炭处理为最低。在烟秆炭有机肥处理中，随着烟秆炭比例的递增，土壤碱解氮含量呈梯度递减。生物质炭增加而土壤碱解氮含量减少的原因可能是生物质炭增加了土壤碳氮比，进而降低土壤有效氮含量[39]，以及生物质炭会吸附NH_4^+-N，因此暂时降低了土壤中氮的有效性[40]。且较高的生物质炭用量可能会因其高密度聚集导致土壤微生物活性受到抑制，降低了土壤氮的有效性，从而降低了土壤碱解氮含量[21]。而有机肥含有丰富的有效态氮[22]，可直接增加土壤有效氮含量。

3.2　烟秆炭有机肥对土壤交换性钙、镁的影响

钙和镁是植株生长的必需中量元素，钙对植株吸收土壤的矿质营养具有重要作用，而镁则能促进植株正常生长以及光合作用等[41]。在本研究中，含烟秆炭量最多的B100处理，其交换性钙、镁达最高水平，这是因为生物质炭含有可溶性钙、镁[42-43]，可直接增加土壤交换性钙、镁含量。而添加了有机肥的处理（CK ~ B60）之间，土壤交换性钙、镁含量较相近。随时间的推移，单施有机肥（CK）的土壤交换性钙、镁含量下降最明显，烟秆炭有机肥和单施烟秆炭处理则较稳定。这是因为生物质炭与有机肥配施赋予了肥料养分一定的缓释性[44]。

3.3　烟秆炭有机肥对土壤有机碳和腐殖物质及其组成的影响

土壤有机质可分为腐殖质和非腐殖质。而腐殖质的主要成分为胡敏酸、富里酸、胡敏素，通常占土壤有机质的60% ~ 80%[4]。有机肥与生物质炭均可不同程度地提升土壤有机碳含量与腐殖物质水平[45-46]。仝利红等[47]通过土壤中配施不同比例的有机无机肥，结果表明，有机肥施入量越高，土壤腐殖物质含量越高。大量长期地施用有机肥可以显著增加土壤胡敏酸含量[48-49]。炭基肥可以提升土壤有机碳及其组分含量，且施用量越高效果越显著[50]。宋祥云等[7]将秸秆、秸秆堆肥和秸秆炭分别施入土壤，发现秸秆炭对胡敏素含量的增加效果优于秸秆及秸秆堆肥。

在本培育试验中，随着烟秆炭量的增加，土壤有机碳、胡敏素含量呈上升趋势，单施烟秆炭B100（15.00 g·kg^{-1}）处理的有机碳、胡敏素含量达到最高水平。生物质炭能增加土壤有机碳、胡敏素的主要原因是生物质炭本身含有大量的碳元素[26]，以及具有吸附聚集难以被微生物利用的有机分子的能力。另外，生物质炭可以通过促进土壤微生物活动进而促进生物质炭向腐殖质碳转换[51]，增加了土壤有机碳含量。大量研究表明，生物质炭可以增加腐殖物质含量，对土壤胡敏素的效果尤为显著[52]，这可能是因为生物质炭不易分解，残留于

胡敏素中[7]。

本研究中单施有机肥处理的土壤胡敏酸含量为最高，在烟秆炭有机肥处理中，胡敏酸含量随着烟秆炭比例增加、有机肥比例的下降而下降。但在单施烟秆炭处理中，胡敏酸含量则随烟秆炭量的减少而降低。说明单施烟秆炭可以提升土壤胡敏酸含量，但有机肥的提升效果更佳，这与赵婷婷等[53]的研究结果不一致，其通过对比单施牛粪及牛粪配施棉秆炭处理对土壤的影响，发现牛粪配施棉秆炭处理的土壤胡敏酸含量高于单施牛粪处理。也有研究表示，从时间长久来看，秸秆堆肥或秸秆堆肥配施生物质炭较单施秸秆、单施生物质炭或秸秆配施生物质炭更有利于土壤胡敏酸含量的提升[7]。究其原因，可能是与不同种类的有机肥料本身所含养分的高低，以及施入土壤后养分的释放速率有关。

本研究中富里酸含量与烟秆炭添加量无明显变化规律，但含烟秆炭量最多的 B100 处理其富里酸含量却最低。这与前人[54]的研究结果不一致。但也有研究通过逐量添加玉米秸秆炭，发现土壤有机碳、胡敏酸、胡敏素含量逐渐增加，富里酸含量却降低。这可能是因生物质炭吸附了富里酸的小分子物质，使其不易被提取而测得的含量偏低有关[55]。

4　结论

（1）烟秆炭无论单施或与有机肥配施均可以提升土壤 pH、全碳、全氮、速效钾含量，且随烟秆炭量的增加效果越显著。而烟秆炭对土壤碱解氮和有效磷含量的影响则有不同。与单施有机肥相比，随着烟秆炭添加量的增加，土壤碱解氮含量总体呈下降趋势。而土壤有效磷含量虽然随烟秆炭量的增加而增加，但含 60% 烟秆炭的有机肥（B60）处理仍大于含烟秆炭量最高的 B100 处理。说明适量的烟秆炭和有机肥配施更有利于土壤有效磷的积累。

（2）单施烟秆炭可以提升土壤交换性钙、镁含量，且随着烟秆炭量的增加而提升。烟秆炭有机肥相较于单施有机肥能增加土壤交换性钙、镁含量，但随烟秆炭比例的增加无明显上升规律。随培育时间的延长，单施有机肥的土壤交换性钙、镁下降幅度最大（21%、14%），添加烟秆炭可以使提升效果更稳定。

（3）烟秆炭能显著提升土壤有机碳和胡敏素含量。单施烟秆炭或有机肥均能提升土壤胡敏酸含量，但有机肥效果更明显。烟秆炭有机肥相比单施烟秆炭更有利于土壤胡敏酸含量的积累。而高量的烟秆炭对土壤富里酸含量有降低作用。

综合来看，含 60% 烟秆炭的有机肥（B60）处理更有利于提升土壤有效养分和腐殖物质的形成。

参考文献：

[1]　李军，李吉昌，吴晓华，等．烟草废弃物利用研究［J］．云南化工，2010，37（2）：44–49.

[2]　王成己，陈庆荣，陈曦，等．烟秆生物质炭对烟草根际土壤养分及细菌群落的影响［J］．中国烟草科学，2017，38（1）：42–47.

[3]　刘敏，杨永锋，陈红丽．不同有机物配施化肥对植烟土壤腐殖质碳的影响［J］．河南农业科学，2017，46（2）：38–42.

[4]　窦森，于水强，张晋京．不同 CO_2 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响［J］．土壤学报，2007（3）：458–466.

[5]　曹新志，于艳青．浅析腐殖质对提升土壤肥力的作用［J］．现代农村科技，2020，586（6）：68.

[6]　宋祥云，宋春燕，柳新伟，等．小麦玉米轮作条件下不同生物质炭对土壤腐殖物质的影响［J］．土壤学报，2021（3）：1–10.

[7]　宋祥云，岳鑫，孔祥平，等．有机物料对盐土腐殖物质组成和结构特征的影响［J］．土壤学报，2020，57（2）：414–424.

[8]　王成己，唐莉娜，胡忠良，等．生物炭和炭基肥在烟草农业的应用及展望［J］．核农学报，2021，35（4）：997–1007.

[9]　曹志洪．生物炭与污染土壤修复及烟草行业的研发进展［J］．中国烟草学报，2019，25（3）：1–12.

[10]　张永红，刘飞，钟松．土壤无机碳研究进展［J］．湖北农业科学，2021，60（10）：5–9，14.

[11]　Raza S，Miao N，Wang P，et al．Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen–induced soil acidification in chinese croplands［J］．Global Change Biology，2020，26（6）：3738–3751.

[12]　杨黎芳，李贵桐．土壤无机碳研究进展［J］．土壤通报，2011，42（4）：986–990.

[13]　Lal R．Soil carbon sequestration to mitigate climate change［J］．Geoderma，2004，123（1）：1–22.

[14]　Liu Z，Sun Y F，Zhang Y Q，et al．Desert soil sequesters atmospheric CO_2 by microbial mineral formation［J］．Geoderma：An International Journal of Soil Science，2020，361：114104.

[15]　Leigh D B，Franz Z，Nicola R，et al．Long–term effects of biochar on soil physical properties［J］．Geoderma，2016，282：96–102.

[16]　原鲁明，赵立欣，沈玉君，等．我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展［J］．中国农业科技导报，2015，17（4）：107–113.

[17]　Wu W X，Yang M，Feng Q B，et al．Chemical characterization of rice straw–derived biochar for soil amendment［J］．Biomass & Bioenergy，2012，47：268–276.

［18］ 刘玉学，唐旭，杨生茂，等．生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展［J］．植物营养与肥料学报，2016，22（6）：1690–1695.

［19］ 牛亚茹，付祥峰，邱良祝，等．施用生物质炭对大棚土壤特性、黄瓜品质和根结线虫病的影响［J］．土壤，2017，49（1）：57–62.

［20］ 陶朋闯，陈效民，靳泽文，等．生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响［J］．水土保持学报，2016，30（1）：231–235.

［21］ 冯慧琳，何欢辉，徐茜，等．生物炭与氮肥配施对植烟土壤微生物及碳氮含量特征的影响［J］．中国土壤与肥料，2021（6）：48–56.

［22］ 张影，刘星，焦瑞锋，等．生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响［J］．中国生态农业学报，2017，25（9）：1287–1297.

［23］ Cheng J，Li Y，Gao W，et al．Effects of biochar on cd and pb mobility and microbial community composition in a calcareous soil planted with tobacco［J］．Biology and Fertility of Soils，2018，54（3）：373–383.

［24］ 刘兴，武国慧，张玉兰，等．生物炭施用方式对黑土和潮棕壤养分及氮磷转化相关酶活性的影响［J］．应用生态学报，2021，32（8）：2693–2702.

［25］ 向书江，余泺，熊子怡，等．化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响［J］．环境科学，2021，42（12）：6067–6077.

［26］ 袁金华，徐仁扣．生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展［J］．生态环境学报，2011，20（4）：779–785.

［27］ 程效义，兰宇，任晓峰，等．生物炭对连作设施土壤酶活性及黄瓜根系性状的影响［J］．沈阳农业大学学报，2017，48（4）：418–423.

［28］ Angst T E，Sohi S P．Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar［J］．Global Change Biology Bioenergy，2013，5（2）：221–226.

［29］ 赵世翔，于小玲，李忠徽，等．不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响：对土壤活性有机碳的影响［J］．环境科学，2017，38（1）：333–342.

［30］ Zimmerman A R，Gao B，Ahn M．Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar–amended soils［J］．Soil Biology & Biochemistry，2011，43（6）：1169–1179.

［31］ 陈红霞，杜章留，郭伟，等．施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响［J］．应用生态学报，2011，22（11）：2930–2934.

［32］ Renkou X．Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China．［J］．Soil Research，2012（7）：570–578.

［33］ 刘悦，黎子涵，邹博，等．生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展［J］．应用生态学报，2017，28（3）：1030–1038.

［34］ Laird D A，Fleming P，Davis D D，et al．Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil［J］．Geoderma，2010，158（3）：443–449.

［35］ 曾国胜，钮红．有机肥替代化肥对土壤肥力的影响［J］．农业科技与信息，2021，618（13）：56–59.

［36］ Laird D，Fleming P，Wang B，et al．Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil［J］．Geoderma，2010，158（3）：436–442.

［37］ Zhang Y，Tan Q，Hu C，et al．Differences in responses of soil microbial properties and trifoliate orange seedling to biochar derived from three feedstocks［J］．Journal of Soils and Sediments，2015，15（3）：541–551.

［38］ 陈丽美，李小英，陆晓英，等．竹炭与有机肥配施对葡萄根区土壤养分及酶活性的影响［J］．中国农学通报，2021，37（3）：81–89.

［39］ 何绪生，张树清，佘雕，等．生物炭对土壤肥料的作用及未来研究［J］．中国农学通报，2011，27（15）：16–25.

［40］ Spokas K A，Novak J M，Venterea R T．Biochar’s role as an alternative n–fertilizer：ammonia capture［J］．Plant and Soil，2012，350（1）：35–42.

［41］ 刘坤，周冀衡，李强，等．植烟土壤交换性钙镁含量及对烟叶钙镁含量的影响［J］．西南农业学报，2017，30（9）：2065–2070.

［42］ 丛铭，张梦阳，夏浩，等．施用生物炭对红壤中不同形态钾含量及小白菜生长的影响［J］．华中农业大学学报，2020，39（4）：22–28.

［43］ Demirbas A．Effects of temperature and particle size on bio–char yield from pyrolysis of agricultural residues［J］．Journal of Analytical and Applied Pyrolysis，2004，72（2）：243–248.

［44］ 魏春辉，任奕林，刘峰，等．生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展［J］．河南农业科学，2016，45（3）：14–19.

［45］ Senesi N，Plaza C，Brunetti G，et al．A comparative survey of recent results on humic–like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances［J］．Soil Biology & Biochemistry，2007，39（6）：1244–1262.

［46］ Xu J M，Wu J J，He Y．Functions of natural organic matter in Changing environment［M］．Dordrecht：Springer，2013.

［47］ 仝利红，祝凌，赵楠，等．不同比例有机无机肥配施土壤腐殖质组分的光谱学特征［J］．光谱学与光谱分析，2021，41（2）：523–528.

［48］ Song X Y，Liu S T，Liu Q H，et al．Carbon sequestration in soil humic substances under long–term fertilization in a wheat–maize system from north china［J］．Journal of Integrative Agriculture，2014，13（3）：562–569.

［49］ 梁尧，韩晓增，丁雪丽，等．不同有机肥输入量对黑土密度分组中碳、氮分配的影响［J］．水土保持学报，2012，26（1）：174–178.

［50］ 胡坤，张红雪，郭力铭，等．烟秆炭基肥对薏苡土壤有机碳组分及微生物群落结构和丰度的影响［J］．中国生态农业学报（中英文），2021，29（9）：1592–1603.

［51］ 范分良，黄平容，唐勇军，等．微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响［J］．环境科学，2012，33

（3）：932–937.
［52］ 白小艳，窦森．施玉米秸秆生物质炭对土壤腐殖质组成和结构特征的影响［J］．吉林农业大学学报，2019，41（3）：330–335.
［53］ 赵婷婷，刘蕾，柳新伟，等．牛粪配施生物质炭的土壤碳净变化率和腐殖物质组成研究［J］．土壤学报，2021，58（3）：619–627.
［54］ 张葛，窦森，谢祖彬，等．施用生物质炭对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征影响［J］．环境科学学报，2016，36（2）：614–620.
［55］ Kramer R，Kujawinski E，Hatcher P．Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry［J］．Environmental Science & Technology，2004，38（12）：3387–3395.

Effects of combined tobacco stalk biochar and organic fertilizer on soil main nutrients and humus matter

LIN Ying[1]，HE Jie-wen[2]，CHEN Xing-feng[3]，ZENG Wen-long[4]，XIONG De-zhong[2]，CAI Hai-yang[2*]（1. Fujian Forestry Vocational and technical College，Nanping Fujian 353000；2. College of Resources and Environment，Fujian Agriculture and Forestry University，Fuzhou Fujian 350002；3. Fujian Tobacco Quality Supervision & Test Station，Fuzhou Fujian 350001；4. Longyan Tobacco Branch Company，Longyan Fujian 364000）

Abstract：In order to explore the effects of tobacco stalk biochar organic fertilizer on soil main nutrients and humus substances，indoor soil cultivation experiment was conducted with organic fertilizer，tobacco stalk biochar organic fertilizer and tobacco stalk biochar. Eight treatments were set up，which were control treatment（CK，single application of organic fertilizer），tobacco stalk biochar accounted for 10%（B10），20%（B20），40%（B40），60%（B60）of organic fertilizer，and tobacco stalk biochar accounted for 100%（B100），1/2 amount of tobacco stalk biochar（BH），1/4 amount of tobacco stalk biochar（B2H）. The results showed as follows：（1）compared with CK，tobacco stalk biochar effectively increased soil pH and the accumulation of soil available potassium，total carbon and total nitrogen，and the content of available potassium and total carbon in B100 treatment increased by 55.1%and 132.1%，respectively. The soil available phosphorus content increased with the increase of tobacco stalk carbon content，but the improvement effect of tobacco stalk biochar organic fertilizer was better than that of tobacco stalk biochar single application，among which B60 treatment was the largest（72.69 mg・kg^{-1}），B100 treatment was the second（46.76 mg・kg^{-1}）. However，the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in soil was decreased by tobacco stalk biochar，and the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in soil under B100 treatment was the lowest，which was reduced by 21.3%，compared with the control.（2）Tobacco stalk biochar increased the exchangeable Ca and exchangeable Mg content in soil，and the effect of tobacco stalk biochar addition was more stable than that of organic fertilizer alone with the extension of incubation time.（3）Tobacco stalk biochar significantly increased soil organic carbon and humin content. Compared with CK，B100 treatment increased organic carbon by 68.6%and humin by 147.8%，respectively. In B10 ~ B60 treatment，humic acid content in soil was decreased with the increase of tobacco stalk biochar ratio. In B2H ~ B100 treatment，humic acid content was increased slightly with the increase of carbon application. The content of fulferic acid in soil was the lowest in B100 treatment，which had the highest amount of tobacco stalk biochar. In general，under the same amount of fertilization，organic fertilizer is beneficial to the improvement of soil alkali-hydrolyzed nitrogen，and promote the formation of humic acid and fulferic acid in soil. Tobacco stalk biochar was able to increase soil carbon，total nitrogen，available potassium，available phosphorus and exchangeable magnesium. In conclusion，organic fertilizer containing 60% tobacco stalk biochar（B60）could improve soil main nutrients and the formation of soil humus.

Key words：tobacco stalk biochar-organic fertilizer；soil nutrients；humic substances