

玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化

段宏美, 窦森, 王德辉, 郑爽, 李双翼, 张一枫, 白月

引用本文:

段宏美, 窦森, 王德辉, 等. 玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2159–2166.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0315>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

邵满娇, 窦森, 谢祖彬

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2202–2209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0123>

玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响

董珊珊, 窦森

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 322–328 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1131>

土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响

杨华, 陈莎莎, 冯哲叶, 邓照亮, 李真, 王世梅

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2080–2085 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0379>

外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响

刘媛媛, 徐智, 陈卓君, 汤利

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2483–2490 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0377>

施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响

孟凡荣, 窦森, 尹显宝, 张葛, 钟双玲

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 122–128 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.017>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

段宏美, 窦森, 王德辉, 等. 玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2159–2166.

DUAN H M, DOU S, WANG D H, et al. Improvement effects of corn steep liquor and other organic materials on alkaline soil and the change in humus characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2159–2166.



开放科学 OSID

玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化

段宏美¹, 窦森^{1*}, 王德辉², 郑爽¹, 李双翼¹, 张一枫¹, 白月¹

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 大成生化科技集团有限公司, 长春 130062)

摘要:为研究玉米浆(CSL)及其与不同有机物料混合对苏打盐碱土的改良效果及腐殖质特性变化, 本文以松原市苏打盐碱土为研究对象, 设置对照组(CK)、1/2倍用量玉米浆(1/2CSL)、1倍量玉米浆(CSL)、2倍量玉米浆(2CSL)、1/2倍用量玉米浆与秸秆混合(1/2CSL+C)、1/2倍用量玉米浆与生物质炭混合(1/2CSL+B)和1/2倍用量玉米浆与泥炭混合(1/2CSL+P)7个处理, 研究了其对苏打盐碱土的改良效果及腐殖质组成和胡敏酸(HA)结构特征的变化。每个处理3次重复。结果表明:与CK相比, 除2CSL, 各玉米产量均增加, 增长比率为66.67%~193.65%, 各处理pH、全盐量的降低比率分别为9.80%~11.09%、12.2%~44.3%, 碱化度降低12.67~26.53个百分点。1/2CSL处理的有机碳含量增加了46.19%, HA和胡敏素(HM)分别增加了48.59%和47.32%, I_{2920}/I_{1720} 增加了156.3%, H/C增加了25.96%, (O+S)/C降低了30.68%, 放热量高温值/中温值降低了48.6%, 质量损失量高温值/中温值降低了14.2%。说明有机物料的施入使土壤HA结构的脂族性增强, 氧化度、缩合度和热稳定性降低, 结构趋于年轻化, 其中1/2CSL处理效果最好。

关键词:玉米浆; 苏打盐碱土; 改良效果; 腐殖质组成; 胡敏酸结构

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)10-2159-08 doi:10.11654/jaes.2021-0315

Improvement effects of corn steep liquor and other organic materials on alkaline soil and the change in humus characteristics

DUAN Hongmei¹, DOU Sen^{1*}, WANG Dehui², ZHENG Shuang¹, LI Shuangyi¹, ZHANG Yifeng¹, BAI Yue¹

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Globalbiochem Technology Group Company Limited (GBT), Changchun 130062, China)

Abstract: The present study evaluated effects of corn steep liquor (CSL) and its mixture with different organic materials on the improvement of saline-alkali soil and the change in humus characteristics. Saline soils from Songyuan City were used as the research object, and the following treatments were established: the control group (CK), 1/2 times the amount of corn steep liquor (1/2CSL), 1 times the amount of corn steep liquor (CSL), 2 times the amount of corn steep liquor (2CSL), 1/2 times the amount of corn steep liquor mixed with straw (1/2CSL+C), 1/2 times the amount of corn steep liquor mixed with biomass charcoal (1/2CSL+B), and 1/2 times the amount of corn steep liquor mixed with peat (1/2CSL+P). The improvement effect of saline-alkali soil and the changes in humus composition and humic acid (HA) structure characteristics were studied. Three replicates per treatment were used. The results showed that compared with CK, except for 2CSL, the yield of corn after each treatment increased by 66.67%~193.65%, and the pH, total salt content of each soil increased by 9.80%~11.09%, and 12.2%~44.3%, respectively, the alkalinity increased 12.67~26.53 percentage points. The organic carbon

收稿日期: 2021-03-15 录用日期: 2021-06-04

作者简介: 段宏美(1993—), 女, 河北承德人, 硕士研究生, 研究方向为土壤环境与生物化学。E-mail: 993123408@qq.com

*通信作者: 窦森 E-mail: dousen1959@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077022); 吉林省重点研究发展计划项目(20200402098NC)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42077022); The Key Research and Development Program of Jilin Province (20200402098NC)

content of the 1/2CSL treatment increased by 46.19%, HA, and humin (HM) increased by 48.59% and 47.32%, respectively, I_{2920}/I_{1720} increased by 156.3%, H/C increased by 25.96%, and (O+S)/C decreased by 30.68%. The high/medium heat release ratio decreased by 48.6%, and the high/medium weight loss ratio decreased by 14.2%. This shows that the application of organic materials enhances the aliphaticity of the soil HA structure, reduces the degree of oxidation, condensation, and thermal stability, and tends to produce a younger structure. In addition, the 1/2CSL treatment is found to be the most suitable.

Keywords: corn steep liquor; saline-alkali soil; improvement effect; humus composition; humic acid structure

玉米浆(CSL)是湿法工艺生产玉米淀粉时的主要副产品,是一种黏稠酸性的浆体^[1]。玉米浆含有大量的氨基酸、维生素和生长因子^[2],成本低廉^[3],且富含多种蛋白质、可溶性糖、矿物质等营养物质^[4],在农业上有应用潜力。

盐碱土有机质含量低,保水保肥能力差,影响作物的正常吸收和代谢机能^[5]。王佳丽等^[6]研究表明施用有机物料可以增加盐碱土的有机质含量,改善胡敏酸(HA)等组分的动态变化。

近年来,许多学者对有机物料改善土壤结构做了大量研究。董印丽等^[7]研究发现玉米秸秆直接还田能提高土壤有机质含量,改善土壤肥力状况。SONG等^[8]研究表明施用生物质炭可增加土壤有机碳的芳基碳相对含量,缩合度升高,氧化度下降,热稳定性提高,有利于土壤有机碳的稳定。郑延云等^[9]研究发现,木本泥炭HA组分的缩合度和芳香化度更高,相对难被微生物分解,腐殖化程度高。董珊珊等^[10-11]研究发现,有机物料加入土壤后为微生物提供了大量有机碳源,提升了微生物新陈代谢速率。屈忠义等^[12]研究表明,土壤是微生物最好的培养基,土壤中微生物的数量反映了土壤肥力的大小,对植被生长发育起着重要的作用。而玉米浆作为最廉价的有机氮源之一^[3],其具有较强的酸性^[13]。赵新河等^[14]研究发现,用玉米浆做微生物培养基,可以有效降低原料成本。另一方面,WU等^[15]发现由于玉米浆的碳、矿物质和氮含量高,因此也被认为是很有前途的基材。本研究以吉林省苏打盐碱土为研究对象,分析玉米浆及其与不同有机物料混合对苏打盐碱土的影响,进一步了解不同有机物料改良剂配施对土壤理化性质、腐殖质组成及胡敏酸结构特性变化的影响,以期在解决资源浪费的同时增加可用的农业用地。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本试验所用土壤于2019年7月采自吉林省松原市安字镇(44°52′49″N, 124°02′32″E),土壤类型为

苏打盐碱土。供试土壤的基本性质为:pH 9.41,电导率 $1\ 087\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,碱解氮 $18\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $96.84\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $153.02\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱化度 45.62%,全盐量 $2.51\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, CO_3^{2-} 含量 $0.827\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, HCO_3^- 含量 $0.430\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cl^- 含量 $0.091\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, SO_4^{2-} 含量 $0.077\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, Ca^{2+} 含量 $0.121\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mg^{2+} 含量 $0.813\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, K^+ 含量 $3.200\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Na^+ 含量 $2.413\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料

本试验使用的玉米浆来自于长春大成生物技术开发有限公司,基本性质如下:pH 3.5~5.5,有机碳含量 $302.9\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $17.77\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, C/N 为 19.87,含水率 65%。

试验所用玉米秸秆(包括玉米叶片和茎秆)来自吉林农业大学教学试验田,粉碎后过 2 mm 筛备用。基本性质为:有机碳含量 $415.3\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $11.91\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, C/N 为 40.72。

试验所用的玉米秸秆生物炭是在 450 °C 马弗炉中在氧气受限的条件下生产的生物炭。基本性质为:有机碳含量 $426.3\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $10.75\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, C/N 为 46.10。

试验所用的草本泥炭来自于敦化市大桥乡俞家村,基本性质为:有机碳含量 $394.3\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $12.07\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, C/N 为 38.21。

1.3 试验设计

试验开始于 2020 年 5 月,称取风干土 7 kg,过 5 mm 筛,放入高 23 cm 直径 21 cm 的圆形桶内。按玉米秸秆年产量 $12\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 全量还田进行计算,每千克土添加 5.30 g 秸秆,相当于每千克土添加 2.20 g 碳。通过每千克秸秆的含碳量折算出玉米浆的施入量,以此为基准共设 7 个处理,分别为不添加玉米浆和有机物料的对照处理(CK)、1/2 倍量玉米浆与秸秆混合(1/2CSL+C)、1/2 倍量玉米浆与生物质炭混合(1/2CSL+B)、1/2 倍玉米浆与泥炭混合(1/2CSL+P)、1/2 倍用量的玉米浆(1/2CSL)、1 倍量玉米浆(CSL)以及 2 倍量的玉米浆(2CSL),每个处理设 3 次重复,通过添

加玉米浆、秸秆、生物炭、泥炭4种有机物料,找出最优的改良配方。其他有机物料的添加量按等碳量计算,玉米浆(通过含水率折算后添加湿的玉米浆)添加140 g,生物炭添加18 g,泥炭添加19 g,各处理的有机物料组成见表1。各处理的C/N均调节为20。将有机物料与土壤充分混合,种植玉米种子3粒,品种为翔玉998(吉林省鸿翔种业有限公司)。定期浇水、测量、记录。出苗后选取长势较好的保留1株。于2020年10月秋收后,使用三点采样法对各处理的土壤进行均匀采集,土壤样品风干后过2 mm筛网,进行化学分析试验。

1.4 测定方法

成熟时收获玉米测定其产量;有机碳含量采用浓硫酸-重铬酸钾外加热-硫酸亚铁滴定的方法测定;腐殖质组成采用腐殖质组成修改法^[16]测定;红外光谱分析采用KBr压片法对样品进行测定,仪器为美国Nicolet-AV360红外光谱仪,波数范围为4 000~400 cm⁻¹,红外谱图的特征峰通过OMNIC软件进行选取。

1.5 数据处理

用SPSS 20.0软件对结果进行显著性差异分析。

表1 试验处理方式

Table 1 Test processing method

处理 Treatment	有机物料 Organic material/g			
	玉米浆 Corn steep liquor	秸秆 Corn straw	生物炭 Biochar	泥炭 Peat
CK	—			
1/2CSL	70			
CSL	140			
2CSL	280			
1/2CSL+C	70	19		
1/2CSL+B	70		18	
1/2CSL+P	70			19

2 结果与分析

2.1 对玉米产量及土壤pH、全盐量、碱化度的影响

各处理玉米产量及土壤pH、全盐量、碱化度如表2所示。除2CSL处理外,各处理玉米产量表现为:1/2CSL>1/2CSL+C>CSL>1/2CSL+P>1/2CSL+B>CK,部分处理间差异显著。与CK相比,1/2CSL、1/2CSL+C、CSL、1/2CSL+P、1/2CSL+B分别增加了193.65%、171.43%、165.08%、74.60%、66.67%。2CSL处理由于过多的玉米浆阻碍了种子的发育生长^[26],没有产量。

各处理的pH、全盐量、碱化度较CK均降低,pH降低了9.80%~11.09%,各处理间pH变化不显著,全盐量降低了12.2%~44.3%,1/2CSL降幅最大。碱化度降低了12.67~26.53个百分点,部分处理全盐量和碱化度差异显著。随着玉米浆施入量的增加,含盐量和碱化度逐渐升高。

2.2 对土壤有机碳含量及腐殖质碳含量的影响

各处理土壤有机碳含量如图1所示。与CK相比各处理土壤有机碳含量均提高且差异显著(2CSL、1/2CSL+P除外),具体表现为1/2CSL>CSL>1/2CSL+C>1/2CSL+B>1/2CSL+P>2CSL,分别较CK增加了46.19%、38.75%、33.22%、32.35%、16.44%和6.06%。各处理中,1/2CSL效果综合最好。

腐殖质的组成成分可以直观地说明土壤养分含量的状况,不同处理的腐殖质各组份均表现为胡敏素(HM)>胡敏酸(HA)>富里酸(FA)(表3)。与CK相比,各处理的腐殖质组分的碳含量均提高且部分处理差异显著,其中1/2CSL效果最好,HM、HA、FA较CK分别增加了47.45%、48.89%、117.95%。

HA所占比例的大小表示土壤腐殖化程度的高低,各处理之间差异显著,表现为CSL>1/2CSL>2CSL>

表2 不同处理对玉米产量及pH、全盐量、碱化度的影响

Table 2 Effects of different treatments on corn yield and pH, total salt content and alkalinity

处理 Treatment	产量/(kg·盆 ⁻¹) Yield/(kg·pot ⁻¹)	pH	全盐量 Total salt content/(g·kg ⁻¹)	碱化度 Alkalinity/%
CK	0.063±0.018d	9.29±0.18a	2.37±0.64a	50.10±6.53a
1/2CSL	0.185±0.017a	8.26±0.24b	1.32±0.24c	23.57±2.53d
CSL	0.167±0.029b	8.38±0.09b	1.51±0.46bc	26.70±3.32cd
2CSL	—	8.29±0.04b	2.06±0.24ab	33.69±1.84bc
1/2CSL+C	0.171±0.013b	8.35±0.07b	1.87±0.05ab	25.76±6.72cd
1/2CSL+B	0.105±0.013c	8.34±0.07b	2.08±0.16ab	36.08±3.32b
1/2CSL+P	0.110±0.008c	8.31±0.02b	1.58±0.03bc	37.43±4.58b

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters represent significant ($P<0.05$) differences among treatments. The same below.

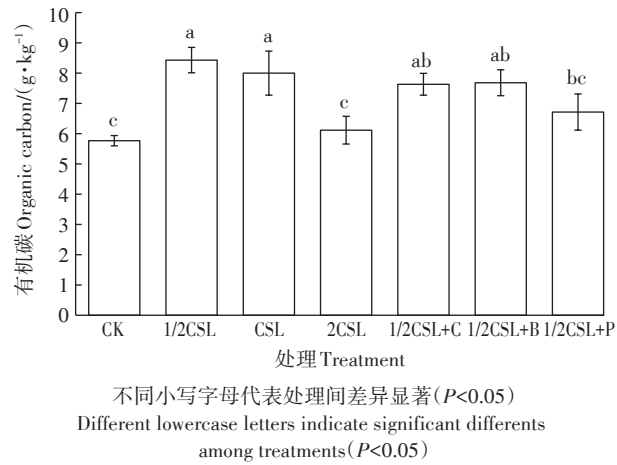


图1 不同处理对苏打盐碱土有机碳含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on the organic carbon content of soda saline-alkaline soil

1/2CSL+C>1/2CSL+B>1/2CSL+P。与CK相比,1/2CSL、CSL、2CSL、1/2CSL+C、1/2CSL+B、1/2CSL+P处理的腐殖化程度分别提高了15.31、15.79、10.21、6.50、5.23、3.64个百分点。说明各有机物料均可以提高盐碱土的腐殖质化程度,以CSL效果最为佳。

2.3 对腐殖质特性变化的影响

2.3.1 元素组成

不同改良剂土壤HA元素组成见表4,各个处理

的HA结构和官能团的变化,可以通过使用C、N、H、O+S元素的含量计算C/N、(O+S)/C、H/C的值来表征^[17]。其中,(O+S)/C的值是用来表示HA碳水化合物和羧酸含量的指标^[18],H/C的值用来表示HA的芳香缩合度和成熟度^[19]。

与CK相比,不同改良剂土壤HA的C、N、H元素均有不同程度的增加,而O元素降低,这说明不同有机物料的改良剂均能促进土壤HA当中O元素的消耗以及C、H、N元素的积累。各处理(O+S)/C值均小于CK,且各处理间无显著差异,降低了18.18%~30.68%,H/C值则与之相反,增加了13.46%~35.58%。

2.3.2 红外光谱

图2为不同处理改良剂土壤HA的FTIR变化规律,表5为不同处理改良剂土壤HA在主要吸收峰相对强度上的差异。图2中各处理的图谱形状走势相似,并且基本结构是相同的,但是不同处理在2 920、2 850、1 720、1 620 cm⁻¹这4处主要吸收峰的强度上有明显的差异,说明在一些关键的官能团上存在一定的差异。2 920 cm⁻¹处代表不对称脂族C—H伸缩振动峰,2 850 cm⁻¹处代表—CH₂—对称脂族C—H伸缩振动峰,1 720 cm⁻¹处代表羧基C=O伸缩振动的吸收峰,1 620 cm⁻¹处代表芳香C=C伸缩振动的吸收峰^[10]。

表3 不同处理对盐碱土腐殖质组成的影响

Table 3 Effects of different treatments on the humus composition of saline-alkali soil

处理 Treatment	胡敏素碳含量 HM-C/(g·kg ⁻¹)	胡敏酸碳含量 HA-C/(g·kg ⁻¹)	富里酸碳含量 FA-C/(g·kg ⁻¹)	HA 所占比例 PQ/%
CK	2.74±0.11c	1.35±0.03d	0.39±0.01d	63.22±3.99b
1/2CSL	4.04±0.54ab	2.01±0.06a	0.85±0.10a	78.53±2.37a
CSL	4.13±0.55a	1.81±0.02b	0.48±0.17c	79.01±4.48a
2CSL	3.89±0.53ab	1.63±0.02c	0.59±0.04bc	73.43±3.42b
1/2CSL+C	3.93±0.53ab	1.57±0.02c	0.68±0.02b	69.72±2.54b
1/2CSL+B	3.81±0.46ab	1.65±0.03bc	0.76±0.09ab	68.45±2.46b
1/2CSL+P	3.36±0.33bc	1.58±0.06c	0.79±0.08ab	66.86±2.41b

表4 不同处理对苏打盐碱土HA元素组成的影响

Table 4 Effects of different treatments on HA element composition of soda saline-alkaline soil

处理 Treatment	各元素含量 Content of element/(g·kg ⁻¹)				摩尔比 The molar ratio	
	C	N	H	(O+S)	(O+S)/C	H/C
CK	428.3	30.32	37.08	501.7	0.88	1.04
1/2CSL	495.2	39.26	54.06	411.5	0.62	1.31
CSL	441.7	42.52	51.79	422.7	0.72	1.41
2CSL	500.9	44.61	49.44	464.2	0.70	1.18
1/2CSL+C	498.4	42.87	52.01	404.3	0.61	1.25
1/2CSL+B	486.7	41.04	55.72	404.8	0.62	1.37
1/2CSL+P	483.0	43.36	52.43	407.5	0.63	1.30

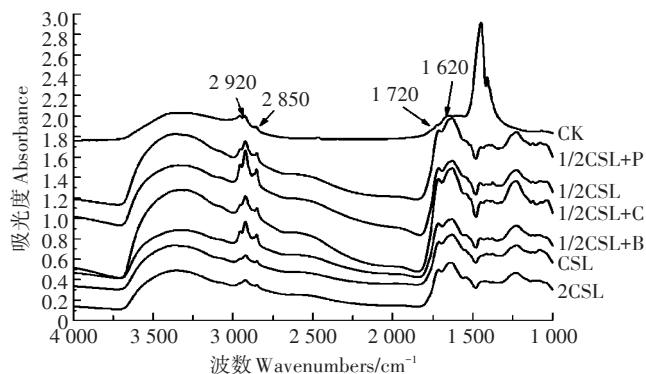


图2 不同处理对苏打盐碱土HA的FTIR谱图的影响

Figure 2 Effects of different treatments on the FTIR spectra of HA in soda saline-alkaline soil

对各处理HA的FTIR光谱主要吸收峰的相对强度进行半定量分析,HA结构的氧化度和芳香性的强弱通过 I_{2920}/I_{1720} 和 I_{2850}/I_{1620} 的值来表示^[10]。

I_{2920}/I_{1720} 和 I_{2920}/I_{1620} 值通常用来反映胡敏酸结构氧化度、脂族性以及芳香性的强弱变化。与CK相比,各处理的HA结构在2920、2850、1620 cm^{-1} 处的吸收强度增加,其中1/2CSL均高于其他处理,说明有机物料施用后各处理的 I_{2920}/I_{1720} 及 I_{2920}/I_{1620} 均提高,土壤胡敏酸的脂族碳/羧基碳和脂族碳/芳香碳增加,表明有机物料的施用使得土壤胡敏酸结构缩合度和氧化度下降,脂族性增强,芳香性降低,胡敏酸结构趋于脂族化、简单化、年轻化。

2.3.3 热稳定性分析

不同改良剂土壤HA的差热曲线(DTA)及热重曲线(TG)如图3所示,对HA热稳定进行半定量分析,结果如表6所示。热稳定性分析结果表明,中温放热是样品结构中酸性基团、碳水化合物和脂肪酸分解的

脱羧反应^[19],高温放热是样品结构中芳香结构的破坏和C—C键的裂解^[20]。

所有样品均表现为中温放热(337~349 $^{\circ}\text{C}$)和高温放热(530~554 $^{\circ}\text{C}$)。与CK相比,各处理中温、高温放热量和质量损失量均增加,相反,各处理HA土壤中,高、中放热量和质量损失量比值降低,其中1/2CSL最显著,热量的高中温比值和质量损失量的高中温比值分别降低了48.6%和14.2%。结果表明,施

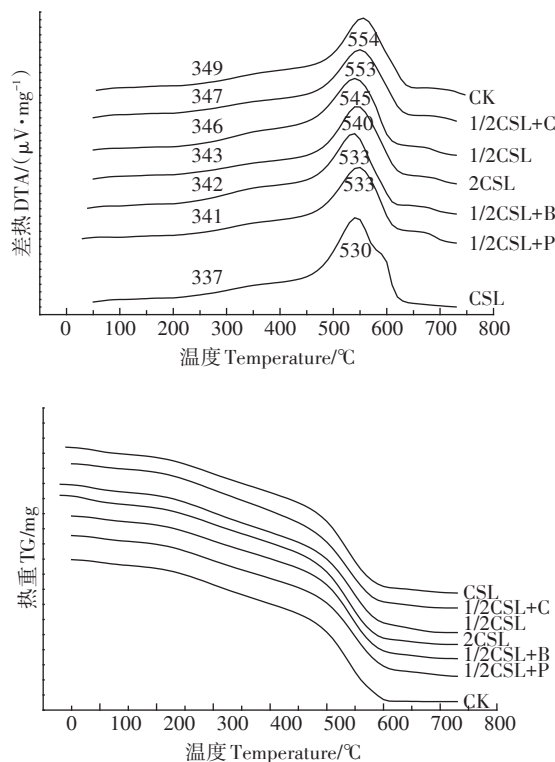


图3 不同处理对苏打盐碱土HA的DTA和TG曲线的影响

Figure 3 Effects of different treatments on the DTA and TG curves of soda saline-alkaline soil HA

表5 不同处理对苏打盐碱土HA的FTIR谱图主要吸收峰强度的影响

Table 5 Effects of different treatments on the main absorption peak intensity of the FTIR spectrum of HA

处理 Treatment	相对强度 Relative intensity/%				比值 Ratio	
	2920 cm^{-1}	2850 cm^{-1}	1720 cm^{-1}	1620 cm^{-1}	I_{2920}/I_{1720}	I_{2920}/I_{1620}
CK	4.483±1.058c	2.337±0.254a	3.880±0.703a	4.357±0.389b	1.836±0.548c	1.454±0.325a
1/2CSL	9.440±0.314a	3.650±1.062a	2.610±0.342b	6.203±0.552a	4.705±0.575a	1.018±0.205a
CSL	5.543±0.689bc	2.793±0.472a	2.753±0.209b	4.680±0.921ab	3.042±0.198b	1.216±0.157a
2CSL	5.263±0.944bc	2.503±0.392a	2.953±0.637ab	4.503±0.776b	2.669±0.242bc	1.364±0.609a
1/2CSL+C	6.310±0.391b	2.850±0.148a	2.740±0.414b	5.863±0.108ab	3.459±0.770b	0.953±0.031a
1/2CSL+B	6.283±0.861b	2.640±0.412a	2.837±0.135ab	6.123±0.205a	3.143±0.208b	0.898±0.108a
1/2CSL+P	5.840±0.185bc	2.440±0.983a	3.380±0.490ab	4.720±0.448ab	2.524±0.544bc	1.261±0.297a

注: $I_{2920}/I_{1720}=(2920+2850)/1720$, $I_{2920}/I_{1620}=(2920+2850)/1620$ 。

Note: $I_{2920}/I_{1720}=(2920+2850)/1720$, $I_{2920}/I_{1620}=(2920+2850)/1620$ 。

表6 不同处理对苏打盐碱土HA放热和质量损失量的影响

Table 6 Effects of different treatments on the heat release and weight loss of HA in soda saline-alkaline soil

处理 Treatment	放热量 Exothermic heat/(kJ·g ⁻¹)			质量损失量 Mass loss/(mg·g ⁻¹)		
	中温 Moderate temperature	高温 High temperature	热量高温值/中温值 Heat ratio of high to moderate temperature	中温 Moderate temperature	高温 High temperature	质量损失量高温值/中温值 Mass loss ratio of high to moderate temperature
CK	0.050±0.009d	8.210±0.149b	170.16±7.664a	124.0±6.289b	445.2±23.127a	3.59±0.045a
1/2CSL	0.102±0.005a	8.830±0.189a	87.53±11.120c	154.9±26.092a	460.1±26.863a	3.08±0.624b
CSL	0.071±0.003b	8.410±0.037ab	118.66±5.680b	131.0±16.612b	450.3±36.217a	3.49±0.528a
2CSL	0.067±0.007bc	8.290±0.046b	123.45±7.524b	131.2±4.327b	450.4±36.778a	3.43±0.200a
1/2CSL+C	0.088±0.007ab	8.260±0.053b	94.81±13.935bc	140.9±26.078ab	452.3±30.957a	3.29±0.467b
1/2CSL+B	0.066±0.004bc	8.440±0.156ab	128.40±12.474b	135.5±5.531b	450.0±23.091a	3.33±0.265ab
1/2CSL+P	0.058±0.009c	8.620±0.363a	148.70±15.007b	139.5±13.248b	451.7±15.403a	3.27±0.351b

用不同有机物料改良剂会导致盐碱土土壤HA中可分解放热的物质增加,热稳定性降低,即HA分子中脂族化合物和芳香化合物增加,其中施入适量的玉米浆效果更为明显。

3 讨论

土壤pH可反映土壤中多项化学作用^[21]。詹绍军等^[22]研究显示,有机物料施入土壤会降低土壤pH。添加有机物料改良剂可以促进土壤中Na⁺的淋失,降低土壤可交换性Na⁺浓度^[23],这与本研究结果一致。施入玉米浆及玉米浆与其他有机物料混合物可降低盐碱土pH值、含盐量和碱化度,这与改良剂对盐碱土的碳固定作用及土壤受盐碱胁迫程度有关^[24]。一方面由于玉米浆中富含饱和脂肪酸^[25]且本身具有比较强的酸性^[1],从而降低了土壤当中的pH,另一方面,玉米浆中同时含有铁离子、锰离子、亚硫酸根、磷酸根等多种离子^[26],它会与土壤中的离子反应,而当过多的玉米浆施入土壤,会使其其中的一些离子进入饱和状态,从而增加了土壤中盐分和交换性钠离子的含量,因此2倍量玉米浆的施入对土壤的改良效果下降。

玉米产量可以直接反映出土壤改良的效果好坏。舒晓晓等^[27]研究发现,有机物料的适量配比可有效促进玉米生长及产量,本研究也得到同样的结果,各处理均能提高玉米产量,以1/2CSL处理的效果最佳,这可能是因为玉米浆富含多种维生素、氨基酸和生长刺激因子,适量的施入可以激发种子萌发及种子生长所需的营养成分。添加玉米浆后,一方面可增加土壤有机质含量,提高微生物的活性,促进了土壤的矿化作用,从而促进了植株的生长发育和生物量碳的积累^[28];另一方面,施用适量的玉米浆提高了土壤中速

效氮、磷、钾的含量^[26],高氮浓度会使光合作用持续升高,促进干物质的积累,进而提高了作物的产量^[29]。可能的原因还有玉米浆的施入为作物提供了良好的酸碱度环境,促进了作物的生长,但值得注意的是,添加过量的玉米浆(2CSL)会导致玉米的产量下降,这可能是因为玉米浆过量会增加土壤Mn²⁺含量,抑制了Fe²⁺和Mg²⁺等元素的吸收及活性,并破坏叶绿体结构,导致叶绿素合成下降及光合速率降低^[30]。

腐殖质是土壤有机质的主要组成部分,对土壤的肥力及理化性质有着重要作用^[31]。宋祥云等^[32]的研究表明,施用有机物料有利于胡敏酸中营养物质的积累,还可以提高土壤的有效养分,增加土壤的有机碳含量。这与本研究结果一致,各处理均能不同程度地增加盐碱土有机碳(图1)和腐殖质组分碳含量(表3),其中,以1/2CSL处理最好。这可能是因为玉米浆营养丰富,且玉米浆中有许多可利用的碳源^[33],施入土壤当中可以提高土壤碳的微生物利用率。

窦森等^[34]的研究表明,通过添加有机物料进行土壤培肥会改变土壤中胡敏酸的结构特征。陈晓东等^[35]研究发现有机物料的施用是土壤中脂族性碳、芳香族碳以及氨基化合物的主要来源之一,可以使吉林地区的盐碱土土壤HA结构趋于年轻化。徐基胜等^[36]研究表明施用有机肥能增加HA中的氨基酸、多肽或蛋白质等物质。孟凡荣等^[37]结合元素分析和红外光谱分析得出,施加有机物料后,土壤HA的缩合程度升高,氧化程度降低,同时HA的脂族碳链结构有所增加,芳香性增强,氧化程度减弱,这与本研究结果一致。本研究结果表明,各处理均能不同程度地改善胡敏酸结构,使得盐碱土中HA的氧化度、缩合度和热稳定性降低,脂族性增强,胡敏酸结构逐渐趋于简单

化,其中以1/2CSL处理效果最好。这是由于适量玉米浆施入土壤后促进了微生物的生长^[38],增加了土壤所需的养分,扩大了微生物的呼吸空间,促进微生物的活性,从而使得HA分子向脂族碳转化^[39]。

4 结论

(1)施入玉米浆显著降低了土壤pH值,当施用量为 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (即2CSL)时,pH值降低幅度达10.76%。玉米浆施用量为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (即1/2CSL)时,全盐量和碱化度分别是CK的0.56倍和0.47倍。

(2)玉米浆施用量为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (即1/2CSL)显著提高了玉米产量及土壤有机碳含量,分别为CK的2.94倍和1.46倍。

(3)施用玉米浆及其与其他有机物料的混合物均能促使(O+S)/C、热量和质量损失量的高中温比值降低,H/C值增加,土壤中HA的氧化度、缩合度和热稳定性降低,脂族性增强,腐殖质特性变化显著。

(4)综上所述,适量施用玉米浆($10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)可以提升盐碱土的土壤质量,提高土壤肥力和作物产量。玉米浆作为工业生产的副产物,在盐碱土的改良及资源的合理利用方面有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] SARWAR M, KHAN M A, UN N M. Influence of ruminally protected fat and urea treated corncobs ensiled with or without corn steep liquor on nutrient intake, digestibility, milk yield and its composition in Nili-Ravi Buffaloes[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2004, 17(1):86-93.
- [2] 陈伟,谷新晰,李广靖,等.玉米赤霉烯酮降解酶ZHD101的表达优化及在玉米浆脱毒中的应用[J].河北农业大学学报,2020,43(6):26-34. CHEN W, GU X X, LI G J, et al. Optimized expression of a zearalenone degrading enzyme(ZHD101) and the application in detoxification of corn steep liquor[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2020, 43(6):26-34.
- [3] LÓPEZ P A, RODRÍGUEZ L L, RINCÓN F M, et al. Characterization of extracellular and cell bound biosurfactants produced by *Aneurinibacillus aneurinilyticus* isolated from commercial corn steep liquor[J]. *Microbiological Research*, 2021, 242:70-77.
- [4] MARTINEZ B, WALTER J, SYDNEY E B, et al. Hydrogen production by dark fermentation using a new low-cost culture medium composed of corn steep liquor and cassava processing water: Process optimization and scale-up[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(Part B):124370.
- [5] 姜伟锦,张松林,刘阳.盐碱地土壤养分和盐含量的空间变异特征研究[J].河南农业科学,2020,49(3):70-78. JIANG Y J, ZHANG S L, LIU Y. Spatial variability of soil nutrient and salt contents in saline-alkali land soil[J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(3):70-78.
- [6] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684. WANG J L, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5):673-684.
- [7] 董印丽,樊慧敏,王建树,等.玉米秸秆还田培肥效果研究[J].广东农业科学,2010,37(2):77-78,85. DONG Y L, FAN H M, WANG J S, et al. Preliminary report of returning corn straw into soil on soil fertility[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(2):77-78, 85.
- [8] SONG X, LI Y, YUE X, et al. Effect of cotton straw-derived materials on native soil organic carbon[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 663:38-44.
- [9] 郑延云,张佳宝,谭钧,等.不同来源腐殖质的化学组成与结构特征研究[J].土壤学报,2019,56(2):386-397. ZHENG Y Y, ZHANG J B, TAN J, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2):386-397.
- [10] 董珊珊,窦森,林琛茗,等.玉米秸秆在土壤中的分解速率及其对腐殖质组成的影响[J].吉林农业大学学报,2016,38(5):579-586. DONG S S, DOU S, LIN C M, et al. Decomposition rate of corn straw in soil and its effects on soil humus composition[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016, 38(5):579-586.
- [11] 董珊珊,窦森,邵满娇,等.秸秆深还不同年限对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J].土壤学报,2017,54(1):150-159. DONG S S, DOU S, SHAO M J, et al. Effect of corn stover deep incorporation with different years on composition of soil humus and structural characteristics of humic acid in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1):150-159.
- [12] 屈忠义,孙慧慧,杨博,等.不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J].农业机械学报,2021,52(4):311-318,350. QU Z Y, SUN H H, YANG B, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2021, 52(4):311-318, 350.
- [13] WU W Q, PANG B, YANG R R, et al. Improvement of the probiotic potential and yield of *Lactobacillus rhamnosus* cells using corn steep liquor[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 131:109862.
- [14] 赵新河,贺壮壮,赵玉斌,等.玉米浆发酵产生物丁醇的氨基酸代谢动力学模拟[J].农业工程学报,2020,36(18):263-274. ZHAO X H, HE Z Z, ZHAO Y B, et al. Kinetic simulation of amino acid metabolism of butanol produced from the fermentation of corn steep liquor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18):263-274.
- [15] WU L, ZHANG W, WEI W, et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135:383-391.
- [16] KUWATSUKA S, WATANABE A, ITOH K, et al. Comparison of two methods of preparation of humic and fulvic acids, IHSS method and NAGOYA method[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(1):23-30.
- [17] 侯淑艳,李双翼,窦森,等.长期秸秆还田对土壤有机碳和胡敏酸结构特征的影响[J/OL].吉林农业大学学报, <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.55849>. HOU S Y, LI S Y, DOU S, et al. Effects of long-term straw returning on soil organic carbon and humic acid structure characteristics[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*, <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.55849>.

- [18] LU X Q, HANNA J V, JOHNSON W D. Source indicators of humic substances: An elemental composition, solid state ^{13}C CP/MAS NMR and Py-GC/MS study[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(7): 1019–1033.
- [19] 宋鸽, POPOV A I, 石峰. 腐殖质生理活性及其与化学组成关系的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 598–610. SONG G, POPOV A I, SHI F. Progress on the physiological activity of humic substances and correlation with its chemical composition[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 598–610.
- [20] SCHULTEN H R, LEINWEBER P. Characterization of humic and soil particles by analytical pyrolysis and computer modeling[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1996, 38(1/2): 1–53.
- [21] FRANCIOSO O, MONTECCHIO D, GIOACCHINI P, et al. Thermal analysis (TG-DTA) and isotopic characterization (^{13}C – ^{15}N) of humic acids from different origins[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(3): 537–544.
- [22] 詹绍军, 喻华, 冯文强, 等. 有机物料与石灰对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(3): 999–1003. ZHAN S J, YU H, FENG W Q, et al. Effects of different organic material and lime on soil pH and available cadmium[J]. *Journal of Southwest Agricultural Sciences*, 2011, 24(3): 999–1003.
- [23] KIM Y, CHOO B, CHO J. Effect of gypsum and rice straw compost application on improvements of soil quality during desalination of reclaimed coastal tideland soils: Ten years of long-term experiments[J]. *Catena*, 2017, 156: 131–138.
- [24] 王著峰, 王玉刚, 陈园园, 等. 施加脱硫石膏对盐碱土固碳的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 353–360. WANG Z F, WANG Y G, CHEN Y Y, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum (FGDG) on carbon sequestration in saline-sodic soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 353–360.
- [25] 王敏, 张敬书, 赵艳丽, 等. HPLC法测定玉米浆中游离氨基酸的含量[J]. 中国酿造, 2010, 5: 156–159. WANG M, ZHANG J S, ZHAO Y L, et al. Determination of free amino acids in corn steep liquor by HPLC[J]. *China Brewing*, 2010, 5: 156–159.
- [26] JYOTISNA S, RALPH S T. Optimization of a corn steep medium for production of ethanol from synthesis gas fermentation by *Clostridium ragsdalei*[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2012, 28: 1553–1561.
- [27] 舒晓晓, 齐丽, 叶胜兰. 不同改良剂对盐碱土植株生长发育的影响[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2020, 5(4): 41–45. SHU X X, QI L, YE S L. Effects of different ameliorants on the growth and development of saline-alkali soil plants[J]. *Western Development (Land Development Engineering Research)*, 2020, 5(4): 41–45.
- [28] 晏梅静, 补春兰, 黄盖群, 等. 丛枝菌根真菌对桑树(*Morus alba*)地上部分的促进作用[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2647–2654. YAN M J, BU C L, HUANG G Q, et al. Promotional effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the aerial parts of mulberry (*Morus alba*) [J]. *Acta Phytophysiology*, 2020, 56(12): 2647–2654.
- [29] LU D J, LU F F, YAN P, et al. Elucidating population establishment associated with N management and cultivars for wheat production in China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 163(163): 81–89.
- [30] PITTMAN J K. Managing the manganese: Molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis[J]. *New Phytologist*, 2005, 167(3): 733–742.
- [31] BELZILE N, JOLY H A, LI H. Characterization of humic substances extracted from Canadian lake sediments[J]. *Canadian Journal of Chemistry*, 1997, 75(1): 14–27.
- [32] 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. SONG X Y, YUE X, KONG X P, et al. Effects of application of organic material on composition and structural characteristics of humic substances in saline soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 414–424.
- [33] 程曦, 刘进峰, 刘丽虹, 等. 玉米浆在阿维菌素发酵配方经济性优化中的应用[J]. 发酵科技通讯, 2020, 49(2): 85–89. CHENG X, LIU J F, LIU L H, et al. Application of corn steep liquor in the economic optimization of abamectin fermentation formula[J]. *Journal of Fermentation Science and Technology*, 2020, 49(2): 85–89.
- [34] 窦森, 陈恩凤, 须湘成, 等. 土壤有机培肥后胡敏酸结构特征变化规律的探讨——I. 胡敏酸的化学性质和热性质[J]. 土壤学报, 1992(2): 199–207. DOU S, CHEN E F, XU X C, et al. Discussion on the changes of the structural characteristics of humic acid after soil organic fertilization. I. The chemical and thermal properties of humic acid[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992(2): 199–207.
- [35] 陈晓东, 吴景贵, 李建明, 等. 有机物料施用下原生盐碱土胡敏酸结构特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 702–709. CHEN X D, WU J G, LI J M, et al. Structural characteristics of humic acid in primary saline-alkali soil as affected by application of organic materials[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 702–709.
- [36] 徐基胜, 赵炳梓, 张佳宝. 长期施有机肥和化肥对潮土胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 647–656. XU J S, ZHAO B Z, ZHANG J B. Effects of long-term application of organic manure and chemical fertilizer on structure of humic acid in fluvo-aquic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3): 647–656.
- [37] 孟凡荣, 窦森, 尹显宝, 等. 施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 122–128. MENG F R, DOU S, YIN X B, et al. Effects of maize stalk biochar on humus composition and humic acid structure in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 122–128.
- [38] 张文艳, 张守一, 张晓春. 玉米浆对榆黄蘑增产效果的研究[J]. 农机化研究, 2005(3): 306. ZHANG W Y, ZHANG S Y, ZHANG X C. Research on the effect of corn steep liquor on the yield of *Pleurotus citrinopileatus* [J]. *Research on Agricultural Mechanization*, 2005(3): 306.
- [39] 吴景贵, 王明辉, 万忠梅, 等. 玉米秸秆腐解过程中形成胡敏酸的组成和结构研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 443–451. WU J G, WANG M H, WAN Z M, et al. Chemical composition and structure of humic acid from composted corn stalk residue[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 443–451.