

不同有机物料对苏打碱化土有机碳库和化学性质的影响

张月鲜^{1,2}, 红梅^{1,2}, 温馨^{1,2}, 裴志福^{1,2}, 赵卉鑫^{1,2}, 陈晨^{1,2}, 温晓亮³

(1.内蒙古农业大学草原与资源环境学院,呼和浩特 010011;2.内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室,呼和浩特 010011;3.五原县农牧业技术推广中心,内蒙古 巴彦淖尔 015118)

摘要: 以内蒙古河套灌区苏打碱化土为研究对象开展田间试验,设置常规施肥(CK)、生物炭+常规施肥(BC)、牛粪+常规施肥(CD)、玉米秸秆+常规施肥(SW)和羊粪+常规施肥(GM)5个处理,研究不同有机物料添加对碱化土壤有机碳(SOC)库和化学性质的影响。分别于2019年和2020年收获季采集0—30 cm耕层土壤,分析不同有机物料添加下SOC及其活性碳组分和主要盐碱指标的变化特征及其相关关系。结果表明:与CK相比,2019年和2020年各有机物料添加处理下SOC平均增幅分别为22.7%和17.2%,土壤有机碳储量(SOCs)平均增幅分别为22.9%和18.2%;4种有机物料均提高了碱化土壤活性有机碳组分含量,其中,CD和GM处理下各活性碳组分含量增幅较其他处理更高;2019年各有机物料添加处理下碳库管理指数(CPMI)较CK提高53.8%~108.3%,2020年提高71.3%~144.1% ($P<0.05$),CD和GM对CPMI的提升作用更明显。土壤化学性质方面,2020年各有机物添加处理下pH均显著下降,BC和CD处理下碱化度(ESP)分别显著下降36.9%和29.3%,CD处理下蔗糖酶活性提高36.7% ($P<0.05$)。主成分分析(PCA)表明,影响苏打碱化土SOC含量变化的主要因素为活性有机碳组分和ESP。牛粪和羊粪施用对苏打碱化土有机碳库质量提升作用较好,生物炭施用对盐碱化指标改良效果最明显。

关键词: 盐渍土; 有机物料; 土壤有机碳库; 有机碳组分; 土壤化学性质

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0311-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.044

Effect of Different Organic Amendments on Soil Organic Carbon Pool and Chemical Properties in Soda Alkaline Soil

ZHANG Yuexian^{1,2}, HONG Mei^{1,2}, WEN Xin^{1,2}, PEI Zhifu^{1,2},

ZHAO Huixin^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}, WEN Xiaoliang³

(1.College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010011;

2.Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources in Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010011;

3.Wuyuan Country Agriculture and Animal Husbandry Technology Promotion Center, Bayannur, Inner Mongolia 015118)

Abstract: A field experiment was conducted in soda alkaline soil in the Hetao Irrigated Area of Inner Mongolia to study the effect of different organic amendments on soil organic carbon (SOC) pool and chemical properties. Five treatments were designed as follows: traditional chemicals fertilizer only (CK), CK + biochar (BC), CK + cow dung (CD), CK + corn straw (SW), CK + goat manure (GM). Soil samples (0—30 cm depth) were collected after maize was harvested in 2019 and 2020, respectively, and the changes of SOC pool, labile organic carbon fractions, main saline and alkaline indexes and the relationship between them were analyzed. The results showed that compared with CK, the average increase of SOC in all organic amendment treatments were 22.7% and 17.2% in 2019 and 2020, respectively. The average increase in organic carbon stock (SOCs) were 22.9% and 18.2%, respectively. Labile organic carbon content increased in organic amendment treatments, among which the increase of CD and GM were higher than those in other treatments. CPMI increased by 53.8%~108.3% in organic amendment treatments compared with CK in 2019, and increased by 71.3%~144.1% in 2020 ($P<0.05$), and the promotive effect of CD and GM treatments was more obvious. As to the chemical properties, pH decreased apparently in four organic amendment treatments in 2020, exchangeable sodium percentage (ESP) decreased by 36.9% and 29.3% in BC and CD treat-

收稿日期: 2021-10-11

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD009)

第一作者: 张月鲜(1987—),女,在读博士研究生,主要从事土壤有机碳稳定机制研究。E-mail: nmgzhangyuexian@126.com

通信作者: 红梅(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事草原土壤利用与保护、土壤生态和面源污染防治研究。E-mail: nmczhm1970@126.com

ments, respectively ($P < 0.05$). Principal component analysis (PCA) showed that labile organic carbon fractions and ESP were the main factors which affected SOC content in soda alkaline soil. Cow dung and sheep manure had better effect on improving the quality of the organic carbon pool, and biochar had the most obvious effect on improving the chemical properties of soda alkaline soil.

Keywords: saline-alkaline soil; organic amendments; soil organic carbon pool; organic carbon fractions; soil chemical properties

我国盐渍化土壤面积约 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 集中分布在西北、华北、东北及沿海地区, 是我国最主要的中低产土壤类型之一^[1]。其中, 耕地中盐渍化面积达 $9.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积的 6.62%^[2]。内蒙古河套灌区是全国乃至亚洲最大的一首制大型自流灌区, 引黄灌溉在对发展灌区农业生产发挥重要作用。由于长期大水漫灌, 渠系水漏以及频繁耕作, 当地土壤次生盐渍化问题突出, 土壤有机碳(SOC)淋失问题日益凸显, 导致土壤有机质含量普遍偏低, 严重限制当地农业可持续发展^[3]。因此, 提升河套灌区受盐渍化影响的农田土壤质量、提高土壤有机碳库容量及其稳定性迫在眉睫。

通过添加外源有机物料可以改良盐渍土基本理化性质, 扩大活性碳库容量, 维持有机碳库供需平衡。前人^[4]研究表明, 施用有机物料可以加速盐渍土中交换性钠的淋失, 降低土壤碱化度(ESP)和电导率(EC)。此外, 有机物料输入还可以提高 SOC 和养分含量、酶和微生物活性, 促进作物生长^[5]。郭军玲等^[6]研究发现, 牛粪和风化处理煤可以提高苏打盐化土易氧化态有机碳、轻组有机碳和可溶性有机碳在总有机碳中的占比; 冀拯宇等^[7]研究表明, 有机土壤改良剂可有效降低土壤全盐量(TS)、钠离子吸附比(SAR)和 pH, 同时增加 SOC 及其活性碳组分含量, 提高土壤碳库管理指数(CPMI); Mandal 等^[8]认为, 盐渍化破坏土壤结构主要是通过破坏团聚体以及分散土壤黏粒造成的。因此, 降低盐度和 pH 是改善盐渍土的基本要求。

SOC 是土壤的重要组成部分, 直接影响着土壤的理化性状, 是衡量土壤肥力的重要指标。根据 SOC 的存在方式, 可将 SOC 组分归类为活性有机碳、慢性(缓效性)有机碳和惰性(稳定性)有机碳^[9]。其中, 活性碳组分转化周期短、易被微生物分解利用, 通常作为土壤碳循环及有效养分变化和周转的敏感指标, 可以指示 SOC 的早期变化。活性碳组分主要包括易氧化有机碳(EOC)、微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)和颗粒态碳(POC)^[10]。迄今为止, 关于有机物料添加对盐渍化土壤 SOC 及其活性碳组分的影响和作用机制尚无普适性的结论, 相关方面的研究能够为加速盐渍化土壤改良、提高盐渍化土壤固碳能力等措施的制定提供指导意见。本文以内蒙古河套灌区苏打碱化土为研究对象, 研

究了生物炭、牛粪、玉米秸秆和羊粪 4 种有机物料添加对 SOC(库)、活性碳组分和部分化学性质的影响, 以期提升河套灌区盐渍化土壤有机碳库有效性和稳定性、改善盐渍化土壤质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于内蒙古巴彦淖尔市五原县新公中镇永联村($40^{\circ}46'30''$ — $41^{\circ}16'45''\text{N}$, $107^{\circ}35'70''$ — $108^{\circ}37'50''\text{E}$), 地处河套平原。该地区气候属于中温带大陆性气候, 年平均气温 6.1°C , 无霜期 126 天左右, 年均降水量 170 mm, 多集中在夏秋两季。土壤类型为灌淤土, 盐渍化类型为苏打氯化物盐渍土, 土壤质地以粉砂壤土为主。根据王遵亲等^[11]的研究, 供试土壤盐渍化程度为轻度碱化。试验前土壤基本理化性质: 土壤容重(BD)为 1.52 g/cm^3 , TS 为 0.77 g/kg , pH 为 9.19, EC 为 $185.26 \mu\text{S/cm}$, ESP 为 8.98%, SOC 为 7.37 g/kg , 全氮(TN)为 1.36 g/kg , 速效磷(Av.P)为 15.87 mg/kg , 速效钾(Av.K)为 105.39 mg/kg 。

1.2 试验设计与田间管理

试验于 2019 年 4 月底开展, 共设置 5 个处理: 常规施肥(CK)、生物炭+常规施肥(BC)、牛粪+常规施肥(CD)、玉米秸秆+常规施肥(SW)和羊粪+常规施肥(GM), 每个处理重复 3 次, 随机区组排列。小区面积为 80 m^2 , 种植作物为玉米。化肥按照当地农民常规用量施用, 分别为尿素(46% N) 900 kg/hm^2 , 过磷酸钙(16% P_2O_5) 600 kg/hm^2 , 硫酸钾(50% K_2O) 150 kg/hm^2 。各有机物添加量按照玉米秸秆全量还田(9.0 t/hm^2)换算后, 以等有机碳量($3.4 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)方式施用。试验中用到的生物炭购自辽宁金和福农业开发有公司, 由玉米秸秆在缺氧条件下烧制 8 h 而成; 牛粪和羊粪购自当地农场, 充分腐熟后施用; 秸秆来源于上季玉米收获后粉碎至 2~3 cm 左右施用。各有机物料基本性质见表 1。

表 1 供试有机物料基本性质及施用量

有机物料	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	施用量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
生物炭	440.0	10.9	0.2	6.9	7.8
牛粪	92.8	6.4	2.0	1.6	37.2
秸秆	383.3	5.7	2.2	6.4	9.0
羊粪	211.0	17.2	5.3	4.6	16.4

2019 年种植玉米前,将有机物料(CK 除外)和基肥(过磷酸钙和硫酸钾)人工均匀撒施于地表,借助旋耕机将其耕翻至土壤中。尿素于 6 月中下旬第 1 次灌水时施用。玉米于 4 月底播种,10 月初收获,种植品种为“新玉 12”,覆膜后人工点播种植。生育期内以漫灌方式灌溉 2 次。各处理除施用有机物料种类不同外,其他田间管理措施均一致。

1.3 样品采集与分析

2019 年和 2020 年 10 月玉米收获时,按照“S”形在每个小区内选取 5 个采样点,分别用土钻采集 0—30 cm 土层的土壤后均匀混合为 1 个样品。每个样品分为 2 份:一份风干后过 0.25 mm 筛用于测定 SOC 等常规指标;另一份样品于 4 ℃ 冰箱中冷藏保存用于测定活性碳组分等指标。

pH 和 EC 分别采用实验室酸度计法(pH 计 STARTER 2100)和电导仪法(电导率仪 STARTER 3100C)测定,水土比为 2.5 : 1 浸提后测定浸提液;采用原子吸收法^[12]测定 ESP;分别采用 3,5—二硝基水杨酸比色法和高锰酸钾滴定法^[13]测定蔗糖酶和过氧化氢酶活性;采用重铬酸钾—浓硫酸处加热氧化法测定 SOC;采用轻度碱性(0.1 mol/L CaCl₂)稀释(0.02 mol/L)KMnO₄ 溶液氧化法测定 EOC 含量;MBC 和 DOC 分别在氯仿熏蒸和 K₂SO₄ 提取浸提液后,用总有机碳分析仪分析测定;采用六偏磷酸钠分散—重铬酸钾—浓硫酸外加热氧化法测定 POC 含量。具体方法参照文献[12-13]。

1.4 数据计算与分析

有机碳储量 $SOC_s = SOC \times BD \times t \times 0.1$
式中: SOC_s 为 0—30 cm 深度的土壤有机碳储量(t/hm²);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);BD 为 0—30 cm 土层土壤容重(g/cm³);t 为土层厚度(cm);0.1为换算系数。

土壤碳库管理指数(CPMI)指土壤碳库指数与碳库活度指数的乘积,从土壤有机质数量和活性 2 方面反映了土壤管理措施对土壤有机质的影响。采用 Blair 等^[14]提出的方法计算,选取不添加有机物处理(CK)作为参照土壤,计算方法为:

土壤碳库管理指数 $CPMI = CPI \times LI \times 100$
式中: CPI 为碳库指数,指样品土壤与参考土壤总有机质含量的比值。

碳库指数(CPI) = 样品土壤总有机质含量(g/kg)/参照土壤总有机质含量(g/kg)

LI 为土壤碳库的活度指数,指样品土壤与参考土壤碳库活度的比值。

活度指数(LI) = 样品土壤碳库活度(L)/对照土壤碳库活度(L₀)

碳库活度(L)用来表征土壤碳的不稳定性,指土壤中的不同活性组分有机质与该活性对应的非活性有机质的比值。

碳库活度(L) = 样品土壤活性有机质含量/样品土壤非活性有机质含量

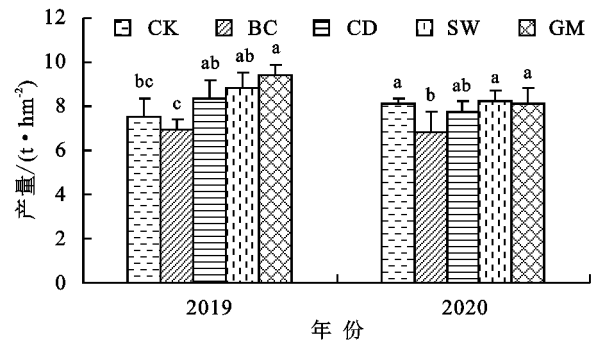
试验以 CK 处理土壤为参考土壤计算 CPMI, CPMI 计算的数据分别来自 2019 年和 2020 年 10 月采集土壤样品分析测定数据。

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 25.0 软件进行数据处理和分析,用 Microsoft Excel 2007 和 Canoco 5 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料添加对玉米产量的影响

由图 1 可知,2019 年 GM 处理下玉米产量为 9.43 t/hm²,较 CK 显著增加了 25.3%($P < 0.05$),其余处理与 CK 相比无显著差异。2020 年,BC 处理较 CK 处理显著下降 16.0%($P < 0.05$),其余处理间无显著差异。可见,对于碱化土壤而言,添加有机物料在短期内未能对玉米产量产生明显增产效应。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同有机物料添加对玉米产量的影响

2.2 不同有机物料添加对碱化土壤有机碳库的影响

2.2.1 有机碳含量与储量 由图 2 可知,2019 年 BC 和 CD 处理下 SOC 较 CK 分别显著增加 25.4% 和 23.7%,2020 年 BC,CD 和 GM 处理下 SOC 分别增加 30.9%,19.6% 和 25.6% ($P < 0.05$),SW 处理下 SOC 无显著变化。可见,短期内生物炭、牛粪和羊粪添加可显著提高碱化土壤有机碳含量。

2019 年,CK 处理下土壤有机碳储量为 26.1 t/hm²,4 种有机物料添加不同程度提高了土壤有机碳储量,提高幅度为 21.3%~25.7% ($P < 0.05$)。2020 年,与 CK 相比 SW 处理下土壤有机碳储量无明显变化,BC、CD 和 GM 处理下土壤有机碳储量分别增加

33.8%,22.4%和 25.7% ($P<0.05$),平均增幅高于 2019 年,不同有机物料添加处理下土壤有机碳储量大小排序为 $BC>GM>CD>CK>SW$ 。由表 4 可

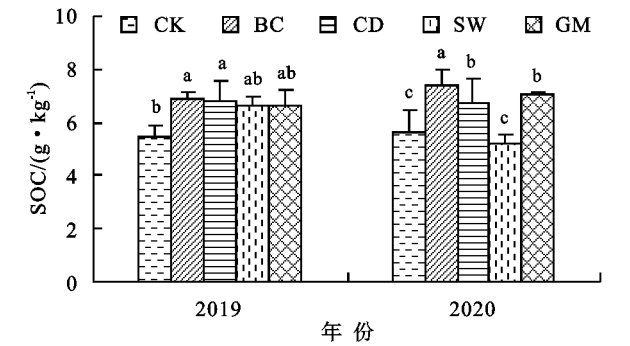


图 2 不同有机物料添加处理下 SOC 和 SOC_s 变化

2.2.2 活性有机碳组分 不同有机物料添加对土壤活性有机碳组分 EOC、MBC、DOC 和 POC 的影响见表 2。2019 年,各处理下 EOC 含量分别为 4.16~5.49 g/kg,其中,CD 和 GM 处理下 EOC 含量较 CK 分别显著提高 29.6%和 31.9%,SW 处理下 EOC 含量显著降低 18.5% ($P<0.05$)。2020 年,CD 和 GM 处理下 EOC 含量较 CK 分别提高 55.5%和 41.5% ($P<0.05$),与 2019 年相比增幅较高,其余处理间无显著差异。

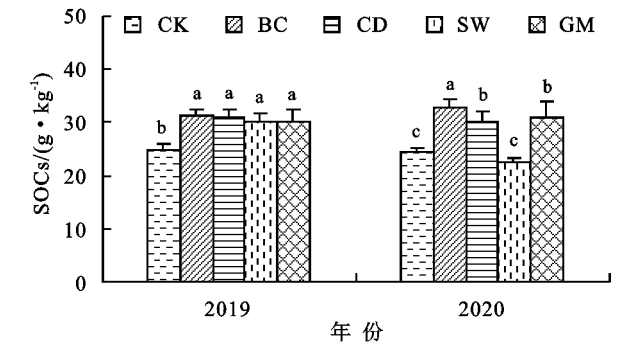
表 2 不同有机物料添加处理下土壤活性碳组分变化					
年份	处理	EOC/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	MBC/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	POC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2019	CK	4.16±0.11b	40.75±5.55d	53.22±9.85a	0.35±0.10c
	BC	4.53±0.28b	47.95±0.10d	40.35±3.10b	0.34±0.07c
	CD	5.39±0.42a	87.86±0.76b	50.70±1.34ab	0.73±0.11a
	SW	3.39±0.35c	64.82±1.87c	54.02±3.98a	0.46±0.09bc
	GM	5.49±0.41a	117.73±1.85a	49.92±0.21ab	0.58±0.04ab
2020	CK	4.16±0.24c	40.06±1.30d	38.50±1.10ab	0.42±0.07d
	BC	3.28±0.76c	63.07±7.30c	34.95±0.69b	0.71±0.08bc
	CD	6.47±0.34a	79.11±1.45b	44.26±8.61a	1.09±0.11a
	SW	4.56±0.34c	60.48±0.65c	40.86±5.42ab	0.61±0.09cd
	GM	5.89±0.14b	90.93±0.69a	45.05±0.40a	0.93±0.03b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

有机物料添加不同程度提高了土壤 MBC 含量,2019 年各处理 MBC 含量变化范围为 40.75~117.73 mg/kg,2020 年各有机物料添加处理下 MBC 含量变化范围为 40.06~90.93 mg/kg。2019 年,除 BC 处理外,其余有机物料处理下 MBC 含量显著增加 59.2%~189.2%,增幅排序为 $GM>CD>SW$ 。2020 年各有机物料处理下 MBC 含量增幅 57.7%~127.3%,增幅排序为 $GM>CD>BC>SW$ 。

总体来看,有机物料添加对碱化土壤 DOC 含量无显著影响。2019 年各处理下 DOC 含量变化范围为 40.35~54.02 mg/kg,其中,BC 处理显著低于 CK

知,试验期内不同有机物料对土壤 BD 未产生显著影响。因此,短期内碱化土壤有机碳储量主要取决于 SOC 变化程度。



处理($P<0.05$),其余处理间无显著差异。2020 年,各有机物料添加处理下 DOC 含量与 CK 之间无显著差异($P>0.05$)。

2020 年各有机物料添加处理下 POC 含量整体高于 2019 年。2019 年,CD 和 GM 处理下 POC 含量较 CK 分别显著提高了 108.5%和 65.7%,2020 年 BC、CD 和 GM 处理较 CK 分别提高了 69.0%,159.5%和 121.4% ($P<0.05$),其中 CD 处理下 POC 含量增幅最高。

2.2.3 碳库管理指数 碳库管理指数(CPMI)通常用来反映土壤肥力和生产潜力。由表 3 可知,2019 年和 2020 年不同有机物料添加处理下 CPMI 指数均显著高于 CK ($P<0.05$),且 2020 年 CPMI 整体高于 2019 年各处理。2019 年各有机物料添加处理 CPMI 较 CK 增幅分别为 53.8%,78.7%,72.3%和 108.3%,增幅排序为 $GM>CD>SW>BC$ 。2020 年各有机物料添加处理 CPMI 较 CK 增幅分别为 71.3%,154.5%,75.5%和 144.1%,增幅排序为 $CD>GM>SW>BC$,可见牛粪和羊粪较玉米秸秆和生物炭对碱化土壤 CPMI 提升作用更为明显。

表 3 不同有机物料添加处理下土壤碳库管理指数					
年份	处理	LI	L	CPI	CPMI
2019	CK	1.00a	1.73bc	1.00c	100.00d
	BC	1.05a	2.53b	1.46b	153.87c
	CD	0.64b	4.83a	2.79a	178.77b
	SW	1.09a	2.72b	1.57b	172.36b
	GM	1.10a	3.27a	1.89b	208.36a
2020	CK	1.00c	2.37b	1.00b	100.00c
	BC	1.21ab	1.20b	0.52b	171.33b
	CD	1.41a	4.05ab	1.68ab	254.56a
	SW	0.97c	2.84ab	1.18ab	175.55b
	GM	1.08bc	8.05a	3.53a	244.10a

2.3 不同有机物料添加对土壤理化性质的影响

由表 4 可知,短期内各有机物料添加处理下土壤

容重无明显变化($P>0.05$)。2020 年不同处理下土壤各项化学性质指标变化较 2019 年更为显著。其中,CD 和 GM 处理下土壤 TN 含量较 CK 分别显著增加 38.0%和 30.0%。SW 处理下 Av.P 含量较 CK 显著降低 34.7%,CD 处理下 Av.K 含量较 CK 显著增加了 16.1%($P<0.05$)。2019 年各处理间土壤 pH 无显著差异;2020 年,各有机物添加处理下 pH 较 CK 分别显著下降 0.38,0.21,0.24 和 0.27 个单位($P<0.05$),大小排序为 CK>CD>SW>GM>BC。2020 年 BC 处理下 EC 较 CK 下降 36.3%,SW 处理

较 CK 增加 29.1%($P<0.05$),其余处理间无显著差异。BC 和 CD 处理下 ESP 分别下降 36.9%和 29.3%($P<0.05$),其余处理间无显著差异。

2019 年各有机物料添加处理下蔗糖酶活性提高 16.7%~46.8%,其中 CD 处理提高幅度最大。2020 年 BC 和 SW 处理下蔗糖酶活性较 CK 分别降低 28.5%和 14.1%,CD 和 GM 处理下分别提高 36.7%和 10.5%。2019 年各处理间过氧化氢酶活性无显著差异,2020 年 BC 处理较 CK 显著降低 16.3%($P<0.05$),其余处理较 CK 无显著变化。

表 4 不同有机物料添加处理下土壤基本性质

年份	处理	BD/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	Av.P/ (mg·kg ⁻¹)	Av.K/ (mg·kg ⁻¹)	pH	EC/ (μS·cm ⁻¹)	ESP/ (%)	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	过氧化氢酶/ (mL·g ⁻¹ ·20 min ⁻¹)
2019	CK	1.53±0.01a	1.56±0.12a	6.6±0.80b	90.53±5.22b	9.07±0.15a	334.57±28.82c	10.19±1.13ab	22.89±1.63c	0.25±0.05a
	BC	1.53±0.02a	1.64±0.11a	7.07±1.32b	77.82±6.21b	9.11±0.09a	440.30±41.63b	10.72±1.89a	27.46±3.32b	0.27±0.02a
	CD	1.49±0.02a	1.67±0.04a	13.29±2.46a	146.3±9.479a	9.00±0.14a	506.37±26.28a	7.76±1.03c	33.59±1.01a	0.28±0.03a
	SW	1.47±0.05a	1.63±0.09a	13.42±2.03a	90.44±2.64b	9.16±0.09a	271.37±27.11cd	8.50±1.47abc	31.51±0.26a	0.27±0.03a
	GM	1.55±0.03a	1.64±0.17a	12.47±0.97a	76.44±9.34b	8.99±0.06a	326.90±38.71d	6.99±1.08c	26.70±0.84b	0.27±0.01a
2020	CK	1.45±0.04a	1.80±0.62a	9.24±1.20ab	113.83±0.88bc	8.83±0.10a	226.53±21.55b	8.4±1.261a	15.67±3.39bc	0.31±0.03a
	BC	1.48±0.02a	1.11±0.10b	8.37±1.60b	104.09±9.93c	8.44±0.03c	144.30±13.98c	5.30±1.04b	11.20±0.14d	0.26±0.01b
	CD	1.48±0.02a	1.67±0.41ab	8.17±0.09b	194.34±24.74a	8.61±0.05b	222.77±32.64b	5.9±1.53b	21.41±0.80a	0.33±0.02a
	SW	1.43±0.10a	2.23±0.12a	6.03±1.1c	117.92±3.70c	8.55±0.06b	292.53±13.48a	7.26±0.79ab	13.46±1.31cd	0.30±0.01ab
	GM	1.45±0.11a	1.83±0.25a	11.10±1.39a	145.99±2.23b	8.59±0.05b	198.17±45.55b	7.10±0.37ab	17.32±1.95b	0.32±0.01a

注:蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 风干土生成葡萄糖的质量(mg)表示;过氧化氢酶活性以 20 min 后 1 g 风干土壤消耗的 0.1 mol/L KMnO₄ 体积(mL)表示。

2.4 土壤有机碳、活性碳组分与主要化学性质之间的关系

对 SOC 及其活性组分、土壤主要化学性质指标进行相关性分析,由表 5 可知,SOC 与 MBC,POC 和蔗糖酶之间为显著正相关关系($P<0.05$),与 EC 和

ESP 均为显著负相关关系($P<0.05$);EOC 与 MBC、POC、EC 和蔗糖酶为显著正相关关系($P<0.05$);pH 和 ESP 为显著正相关关系($P<0.05$)。说明 SOC 与活性有机碳组分之间相互作用,在土壤盐碱化过程中各化学性质相互影响。

表 5 土壤有机碳及其活性组分与土壤化学性质之间的相关分析

指标	SOC	EOC	MBC	DOC	POC	pH	EC	ESP	蔗糖酶	过氧化氢酶
SOC	1.000									
EOC	0.120	1.000								
MBC	0.570 *	0.586 *	1.000							
DOC	0.044	-0.176	-0.330	1.000						
POC	0.654 *	0.578 *	0.771 * *	0.196	1.000					
pH	-0.480	-0.028	-0.232	0.081	-0.195	1.000				
EC	-0.772 *	0.558 *	0.344	-0.158	0.357	0.130	1.000			
ESP	-0.572 *	-0.092	-0.399	-0.165	-0.410	0.552 *	0.352	1.000		
蔗糖酶	0.525 *	0.531 *	0.620 *	0.128	0.745 * *	0.280	0.495	-0.063	1.000	
过氧化氢酶	0.043	0.337	0.212	0.068	0.251	0.300	0.319	0.096	0.735 * *	1.000

注:* 表示 $P<0.05$; * * 表示 $P<0.01$ 。

本研究对土壤主要盐碱指标、SOC 及其活性碳组分进行了主成分分析。由图 3 可知,第 1 排序轴和第 2 排序轴对方差的贡献率分别为 52.44%和 31.32%,累积贡献率为 83.76%,因此前 2 个排序轴可以较好地

概括该组数据。不同有机物料添加处理与 SOC 及其活性组分、盐碱指标的关系在图 3 中分布差异较为明显。其中,BC、CD 和 GM 处理相比 CK 促进了 SOC 及其活性组分的积累,BC 处理在降低 EC 和 ESP 等

盐碱化指标方面具有明显优势。对第 2 排序轴贡献率较大的主要因素为 SOC、EOC、MBC、EC 和 ESP，其中 SOC 与 MBC 和 EOC 为相互促进转化关系，EC 和 ESP 等盐碱化指标与 SOC 及其活性组分之间为负向作用关系。

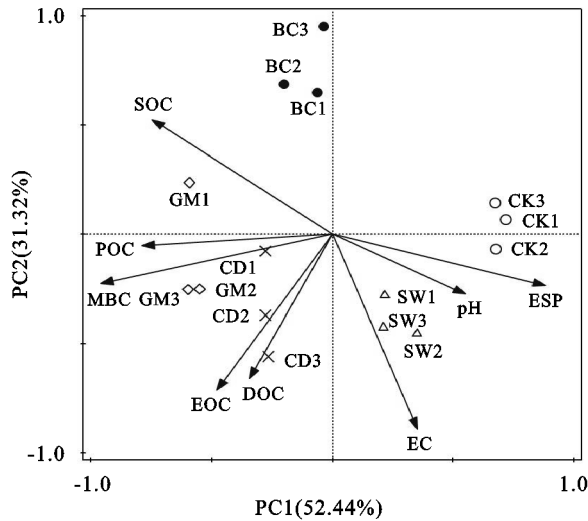


图 3 SOC 及其活性碳组分与土壤盐碱指标之间的主成分分析 (PCA)

3 讨论

3.1 有机物料添加对碱化土壤有机碳库的影响

农田 SOC 的固存主要取决于有机肥、田间生物残体等外源有机物料投入与土壤有机质的矿化和淋溶等形式损失之间的动态平衡^[15]，而外源有机物的输入是 SOC 含量和固碳效应提高的重要途径之一。通常来讲，盐渍土地上生物量低，导致土壤有机质投入少，SOC 含量较低，因此向盐渍土输入有机物料提高 SOC(库)更具必要性。本研究表明，连续 2 年施用生物炭，牛粪和羊粪可显著提高碱化土壤 SOC 含量，这与郭军玲等^[6]、Zheng 等^[16]的研究结果相似。已有研究^[17-19]表明，首先，生物炭富含稳定的多碳芳香族结构，难以被微生物降解利用，因此能够长期稳定存在土壤中；其次，生物炭可通过多价阳离子桥连作用增强黏土颗粒与土壤有机质的结合，从而促进微团聚体形成，利于有机质在盐渍土中的累积；最后，生物炭可以减弱 SOC 的矿化作用，从而减少有机碳的损失。牛粪和羊粪可以显著提高碱化土壤 SOC 含量，这可能是由于这 2 种肥料经过充分腐熟后为土壤提供大量活性物质，利于微生物的利用从而提高碳的转化和固存。SW 处理下 SOC 无明显变化，这可能是由于玉米秸秆种含有大量纤维素和木质素等较难分解的大分子有机物质，因此，短期内难以对土壤有机碳库发挥明显的提升作用。可见，不同外源有机物化学组成和结构性质差异导致有机碳在土壤中的分

解速率差别很大。赵惠丽等^[15]认为，维持 SOC 平衡所需的有机残体投入受土壤性质、种植制度和气候条件等的影响。因此，利于盐渍土固碳的有机物料种类及其添加方式仍需进一步探究。

在农田生态系统中，土壤活性有机碳组分对气候和外界条件反应敏感，在土壤碳循环和固定中起着至关重要的作用^[20]。本研究表明，不同有机物料添加处理下各土壤活性碳组分含量均高于对照，与郭军玲等^[6]、王改玲等^[21]研究结果一致。其中，CD 和 GM 处理下 EOC 和 MBC 增幅高于 BC 和 SW，这可能是由于本研究中用到的牛粪和羊粪都经过腐熟，含有较多活性碳组分，且粪肥中存在大量微生物，进一步提高了土壤中有机的分解和转化效率^[22]。POC 是土壤中与砂粒(>53 μm)结合的有机碳，是新鲜动植物残体向稳定碳库转化的过渡阶段，可指示 SOC 长期积累的趋势^[23]。本研究中，4 种有机物料添加不同程度增加了 POC 含量，故从长远来看，通过有机物料添加的方式可以促进 SOC 在碱化土壤中的固存和积累。

碳库管理指数(CPMI)能够敏感、系统表征施肥对土壤质量的影响，通常 CPMI 值大于 100 则认为该管理方式是可持续的。本研究结果显示，添加有机物料后碱化土壤 CPMI 值显著提高，说明有机物料添加可以改善土壤质量。其中 CD 和 GM 处理下增幅最高，与于维水等^[24]的研究结果一致。这一方面是由于粪肥中含有大量养分及高活性有机碳；另一方面，施用有机肥会促进原有 SOC 的转化，提升碳库活跃程度。相比之下，BC 和 SW 处理 CPMI 值增幅较小，这可能是由于生物炭和秸秆提供的碳源相对较为稳定且不易被微生物分解利用，对提高土壤有机质的质量相对较慢，加之与土壤的 C : N : P 比不同，从而影响了有机肥和土壤中原有有机质的矿化^[25]。

3.2 有机物料添加对碱化土壤化学性质的影响

碱化土壤形成过程中，土壤胶体吸收较多交换性钠，呈现强碱性反应，遇水后通过离子交换或者阳离子桥作用，多价阳离子往往被 Na⁺代替，而 Na⁺可以离散土壤团聚体，加快 SOC 的矿化分解^[26]。因此盐碱地改良的首要目的和基本要求是降低土壤 pH 和含盐量，尤其是有害离子 Na⁺含量^[27]。本研究表明，施用有机物料可明显降低碱化土壤 ESP 等碱化指标，其中生物炭处理效果最好，牛粪次之。已有研究^[28]表明，生物炭中含有大量阳离子同时具有较强的吸附作用，可以置换土壤胶体上的 Na⁺，在降低土壤 ESP 的同时调节土壤 pH。而牛粪添加可促进土壤微生物和动物活性，加速有机物质的分解和周转速

率,分解产生稳定的腐殖酸对土壤酸碱度产生调控作用^[29]。秸秆因含有大量难分解成分如纤维素、半纤维素和木质素等,因此在降低土壤 pH 和调控盐基离子含量方面效果稍差。

前人^[30]研究表明,施用有机肥可以提高土壤养分含量,有效提升土壤肥力。本研究结果显示,施用牛粪和羊粪可显著提升土壤养分含量,其中 CD 处理下土壤 TN 和 Av.K 含量较 CK 分别提高 8.8% 和 45.2%,GM 处理下全氮含量提高 29.6% ($P<0.05$),与丁阔等^[31] 研究结果一致。作物生长所需养分并非单纯依靠土壤本身供给,而是依赖于有机肥施入后土壤环境和酶活性改变引起的土壤转化速率^[32]。而盐碱地由于高盐分或者碱性环境对植物的毒害作用,无法维持大量的植被覆盖,故难以保证对土壤足够的有机质输入。因此,倡导推广秸秆还田、有机肥资源化利用,对于提升盐渍土壤质量具有重要意义。

土壤酶直接参与土壤中物质的转化、养分释放和固定过程,可以调节土壤与作物之间的营养流动^[33]。蔗糖酶和过氧化氢酶是最常用的土壤酶活性指标。蔗糖酶是参与土壤碳循环转化的关键酶之一,过氧化氢酶广泛存在于生物体内,有助于催化过氧化氢分解,减轻其对生物体的毒害作用。本研究中,CD 和 GM 处理下蔗糖酶活性显著增加 ($P<0.05$),而各有机物料添加对碱化土壤过氧化氢酶无显著影响,这与邓欧平等^[34] 研究结果不尽相同。造成此差异的原因可能是因为本试验中供试土壤为碱化土壤,低 SOC 含量、高 pH、通透性差的条件下土壤酶活性总体偏低。可见施肥对酶活性的影响因土壤条件、作物种类和肥料类型与用量不同而差异明显。

3.3 碱化土壤 SOC、活性碳组分与土壤基本化学性质之间的关系

本研究中,SOC、MBC、POC 和蔗糖酶之间存在显著正相关关系 ($P<0.05$),生物炭、牛粪和羊粪添加对 SOC 及其活性组分具有明显促进作用,可知这 3 种有机物料添加可以扩大土壤活性有机碳库容量,增加土壤中蔗糖酶的活性,从而促进碳的转化和固存。同时,ESP 和 EC 等盐碱指标是限制碱化土壤 SOC 固存和提升的主要因素,生物炭在降低碱化土壤 ESP 和 EC 方面作用明显,这可能是由于生物炭中含有大量 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,可以置换土壤胶体上的 Na^+ ,促进盐分淋洗^[35]。

4 结论

在常规施肥基础上,施用生物炭、牛粪、玉米秸秆和羊粪均可增加碱化土壤 0—30 cm 有机碳含量及储量,提高 EOC、MBC、POC 等土壤活性有机碳组分含量,且

可在一定程度上改良碱化土壤化学性质。综合分析认为,施用牛粪和羊粪可显著提升苏打碱化土有机碳库活性及容量,生物炭对苏打碱化土改良效果最佳。主成分分析结果显示,ESP、EC 等与 SOC 及其活性组分呈负向作用关系,表明 ESP 等盐碱化指标是限制碱化土壤 SOC 提升的主要因素。

参考文献:

[1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.

[2] 杨真,王宝山.中国盐渍土资源现状与对策[J].山东农业科学,2015,47(4):125-130.

[3] 刘秉旺,张茂盛,陈龙生,等.内蒙古河套灌区土壤盐渍化成因研究[J].西部资源,2012(3):172-173.

[4] López V F, Fernández L F, Luna G M L, et al. Micro-organisms in sewage sludge added to an extreme alkaline saline soil affect carbon and nitrogen dynamics [J].Applied Soil Ecology,2010,45(3):225-231.

[5] Wu Y P, Li Y F, Zheng C Y, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil [J].European Journal of Soil Biology,2013,54:32-40.

[6] 郭军玲,金辉,郭彩霞,等.不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1290-1299.

[7] 冀拯宇,周吉祥,张贺,等.不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1759-1767.

[8] Mandal U K, Warrington D N, Bhardwaj A K, et al. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis [J].Geoderma,2008,144(1):189-197.

[9] 王晶,解宏图,朱平,等.土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J].生态学杂志,2003,22(6):109-112.

[10] Pei J B, Li H, Li S Y, et al. Dynamics of maize carbon contribution to soil organic carbon in association with soil type and fertility level [J].PLoS One,2015,10(3):e120825.

[11] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[14] Blair G J, Lefroy D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J].Agriculture Research,1995,46(7):59-66.

[15] 赵惠丽,董金碁,师江澜,等.秸秆还田模式对小麦—玉米轮作体系土壤有机碳固存的影响[J].土壤学报,2020,58(1):1-11.

[16] Zheng H, Wang X, Chen L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: Roles of nu-

- trient availability and rhizosphere microbial modulation [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2018(3):517-532.
- [17] 张倩,刘冰洁,余璐,等.生物炭对滨海湿地盐碱土壤碳氮循环的影响[J].*自然资源学报*, 2019, 34(12):2529-2543.
- [18] Kim H S, Kim K R, Yang J E, et al. Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response [J]. *Chemosphere*, 2016, 142:153-159.
- [19] Luo X X, Wang L Y, Liu G C, et al. Effects of biochar on carbon mineralization of coastal wetland soils in the Yellow River Delta, China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94(1):329-336.
- [20] 田慎重,张玉凤,边文范,等.深松和秸秆还田对旋耕农田土壤有机碳活性组分的影响[J].*农业工程学报*, 2020, 36(2):185-192.
- [21] 王改玲,李立科,郝明德.长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J].*植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1):20-26.
- [22] 王朔林,杨艳菊,王改兰,等.长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响[J].*生态学杂志*, 2015, 34(5):1223-1228.
- [23] 于建光,李辉信,陈小云,等.秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J].*应用生态学报*, 2007, 18(4):818-824.
- [24] 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.
- [25] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 7(1):59-68.
- [26] Tedeschi A, Auila R D. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 77(1):308-322.
- [27] Yu J B, Wang Z C, Meixner F X, et al. Biogeochemical characterizations and reclamation Strategies of saline sodic soil in northeastern China [J]. *Clean-Soil Air Water*, 2010, 38(11):1010-1016.
- [28] 田一良,刘艳升,张海兵.盐碱地改良与腐植酸应用技术探讨[J].*腐植酸*, 2018(3):42-46.
- [29] 史雅静,徐明,王振宇,等.蚯蚓对菇渣中纤维素和木质素生物转化的研究[J].*环境科学学报*, 2020, 40(5):1779-1785.
- [30] Yang L, Bian X G, Yang R P, et al. Assessment of organic amendments for improving coastal saline soil [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(9):3204-3211.
- [31] 丁阔,王雪梅,陈波浪,等.施用黑炭和羊粪对库尔勒香梨园土壤理化性质与产量的影响[J].*农业资源与环境学报*, 2015, 32(5):449-455.
- [32] 闵星星,马玉寿,李世雄,等.羊粪对青海草地早熟禾草地生产力和土壤养分的影响[J].*草业科学*, 2014, 31(6):1039-1044.
- [33] 刘威,耿明建,秦自果,等.种植绿肥与稻秸协同还田对单季稻田土壤有机碳库和酶活性的影响[J].*农业工程学报*, 2020, 36(7):125-133.
- [34] 邓欧平,李翰,熊雷,等.秸秆、猪粪混施对麦田根际土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性的影响[J].*土壤*, 2018, 50(1):93-99.
- [35] 高婧,杨劲松,姚荣江,等.不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J].*土壤*, 2019, 51(3):524-529.

(上接第 310 页)

- [16] 王丽娜,罗久富,杨梅香,等.氮添加对退化高寒草地土壤微生物量碳氮的影响[J].*草业学报*, 2019, 28(7):38-48.
- [17] 李素新,覃志杰,刘泰瑞,等.模拟氮沉降对华北落叶松人工林土壤微生物碳和微生物氮的动态影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(1):268-274.
- [18] 刘红梅,张爱林,皇甫超河,等.氮沉降增加对贝加尔针茅草原土壤微生物群落结构的影响[J].*生态环境学报*, 2017, 26(7):1100-1106.
- [19] 陈向峰,刘娟,姜培坤,等.模拟氮沉降对毛竹林土壤生化特性和酶活性的影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(5):277-28.
- [20] Huang J Y, Xu Y X, Yu H L, et al. Soil prokaryotic community shows no response to two years of simulated nitrogen deposition in an arid ecosystem in northwestern China [J]. *Environmental Microbiology*, 2020, 23(2):1222-1237.
- [21] 廖圣祥,任运涛,袁晓波,等.围封对黄土高原草地铵态氮和硝态氮的影响[J].*草业科学*, 2016, 33(6):1044-1053.
- [22] Jorquera M A, Martinez O A, Marileo L G, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the composition of rhizobacterial communities of two *Chilean Andisol* pastures [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, 30(1):99-107.
- [23] Cong J, Liu X D, Lu H, et al. Analyses of the influencing factors of soil microbial functional gene diversity in tropical rainforest based on GeoChip 5.0 [J]. *Genomics Data*, 2015(5):397-398.
- [24] Mirza B S, Potisap C, Nüsslein K, et al. Response of free-living nitrogen-fixing microorganisms to land use change in the Amazon rainforest [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(1):281-288.
- [25] 刘红梅,张海芳,皇甫超河,等.长期氮添加对贝加尔针茅草原土壤微生物群落多样性的影响[J].*农业环境科学学报*, 2017, 36(4):709-717.