

硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳组成及复合体的影响

刘翔毓, 王丽群, 王鸿斌, 赵兴敏, 黄 宁, 宋 昊, 成世荣

(吉林农业大学资源与环境学院, 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

摘要: 通过进行实验室室内培养试验,以盐碱土为研究对象,添加不同梯度有机物料(10,20,30,40,50,60 t/hm²)和同一硫酸铝添加量(0.2 t/hm²),研究硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳组成及复合体的影响。结果表明:施用硫酸铝和有机物料能够显著提高有机碳含量及活性有机碳含量。在施用硫酸铝且有有机物料施用量为 30 t/hm²时,微生物碳增长趋势开始减缓,土壤微生物商值到达峰值,Kos 值与其他处理相比最低;硫酸铝和有机物料的施用可以促进土壤中粒级由小向大聚集,同时使各粒级复合体内有机碳含量增加,在有机物料施用量为 30 t/hm²时,可以明显看出土壤结构变化。即在施用硫酸铝且有有机物料施用量为 30 t/hm²时,既能够有效提高盐碱土土壤肥力,又能改善土壤结构,能够经济合理地改良培肥盐碱地。

关键词: 硫酸铝; 有机物料; 盐碱土; 有机碳; 有机无机复合体

中图分类号: S153.6; S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0387-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.047

Effects of Aluminum Sulfate and Organic Materials on Organic Carbon Composition and Complex in Saline-alkali Soils

LIU Xiangyu, WANG Liqun, WANG Hongbin,

ZHAO Xingmin, HUANG Ning, SONG Hao, CHENG Shirong

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Key Laboratory of

Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Changchun 130118)

Abstract: The effects of aluminum sulfate and organic materials on the composition and complex of organic carbon in saline-alkali soil were studied by laboratory culture experiments and adding different gradient organic materials (10,20,30,40,50,60 t/hm²) and the same amount of aluminum sulfate (0.2 t/hm²). The results showed that the organic carbon content and active organic carbon content could be significantly increased by applying aluminum sulfate and organic materials. When aluminum sulfate was applied and the amount of organic materials was 30 t/hm², the growth trend of microbial carbon began to slow down, the soil microbial quotient reached the peak, and the Kos value was the lowest compared with other treatments. The application of aluminum sulfate and organic materials can promote the aggregation of soil particles from small to large, and at the same time increase the content of organic carbon in the composite body of each particle. When the application amount of organic materials is 30 t/hm², the soil structure can be obviously changed. In other words, when aluminum sulfate is applied and the amount of organic materials is 30 t/hm², the soil fertility and soil structure of saline-alkali soil can be improved effectively, and the saline-alkali soil can be improved economically and reasonably.

Keywords: aluminum sulfate; organic materials; saline-alkali soil; organic carbon; organic-inorganic complex

土地是粮食生产的基础,而盐碱土作为宝贵的耕地后备资源,具有巨大的开发潜力。在疫情发生后,我国的粮食安全问题凸显,大规模开发盐碱地也在如火如荼地进行。吉林省西部苏打盐碱土面积约 170 万 hm²,作为最具开发潜力的土壤资源,对吉林省粮食增产具有重要作用^[1]。在盐碱地改良中,土壤培肥是一项重要环节,但在吉林省西部土地整理项目的实施过程中,发现新开发盐碱地普遍存在有机质匮乏,

收稿日期:2022-02-15
资助项目:中国工程院院地合作重点咨询项目(JL2020-001);吉林省科技厅重点科技攻关项目(20210202023NC);吉林省科技厅重大专项(20200503004SF-3)
第一作者:刘翔毓(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤改良与肥力调控研究。E-mail:Liuxiangyu_02@163.com
通信作者:王丽群(1971—),女,博士,副教授,研究生导师,主要从事土壤改良与肥力调控研究。E-mail:553638817@qq.com

土壤结构差、肥力低等问题。

有机碳是土壤中非常重要的组成部分,是土壤养分的重要来源,其在保持土壤肥力、改善土壤结构、改善生态系统生产力等方面具有重要作用^[2-6]。土壤有机碳并非由单一物质组成,它包括活性有机碳和稳态碳等。活性有机碳作为有机碳的一部分,其有效性很高,能够及时反映出土壤细小的变化,直接影响供给植物的养分^[7-8]。它能够促进土壤微生物活动,为其提供能量,还能够土壤生物地球化学过程中起直接参与的作用^[9]。其中微生物生物量碳可以说是最有活性的碳库,对土壤有机碳的变化极其敏感,能够更好地促进土壤有效养分的供应^[10]。而另一主要组成部分——易氧化有机碳,对外部环境的变化十分敏感,尤其在有机碳有效性和及时性方面能够作出不同程度的反映^[11]。有机无机复合体在土壤中作为土壤肥力的物质基础,可以综合地对土壤肥力的高低进行评价,主要存在形式是有机和无机胶体,它在土壤肥力的提升、土壤在形成中所进行的物质迁移、转化和积累起着重要作用,同时降低土壤有机碳矿化,促进微生物分解^[12]。

目前土壤培肥改良盐碱地主要有秸秆还田、施有机肥、化肥、有机物料等。通过以往研究^[13-15]可知,施用硫酸铝有利于有机无机复合体的形成,同时提高土壤 Kos,增加土壤 ROC(易氧化有机碳);添加有机物对土壤的影响包括理化性质、结构、产量等等,通过已有研究^[16-18]发现,有机物料其主要作用是会显著增加土壤中有机碳含量、改善土壤结构等,在这些基础上达到提高作物产量的目的。

本文以硫酸铝和有机物料为添加物,研究苏打盐碱土有机碳组成及复合体的影响,明确既能有效提高土壤肥力,改良土壤结构,又能达到有机物料最经济的投入量,为经济合理地改良培肥苏打盐碱地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤类型为苏打盐碱土,于 2019 年 10 月采自吉林省大安市海坨乡(123°96′31″E,45°23′87″N)。供试土壤基本理化性质为土壤有机碳含量 4.94 g/kg,碱解氮含量 29.5 mg/kg,速效磷含量 22.3 mg/kg,速效钾含量 129 mg/kg,含盐量 0.31%,碱化度 50.47%,pH 为 9.52。

供试硫酸铝为辽宁兴宇净水剂有限公司生产的硫酸铝。供试有机物料有机碳含量为 404.5 g/kg。

1.2 试验设计

本试验为实验室室内培养试验,试验设置不同梯

度有机物料施用量及同一硫酸铝施用量。有机物料田间施用量为 0,10,20,30,40,50,60 t/hm²,硫酸铝田间施用量均为 0.2 t/hm²,土壤质量约为 2 250 t/hm²,根据上述质量进行计算,1 000 g 土壤中有有机物料的施用量大约为 0,4,9,13,18,22,27 g,硫酸铝的施用量均为 0.1 g。本试验共设置 14 个处理,每个处理重复 3 次。

按上述施用量将硫酸铝和有机物料称出,充分混入到 1 000 g 盐碱土中,加入蒸馏水,将土壤含水率调至 15%(相当于田间持水量的 60%),称重记好质量后,放入 25 ℃恒温培养箱中,培养时间为 220 天。培养期间定期(每隔 5 天)进行称重,通过称质量来补充水的蒸发量。培养于 2020 年 7 月 20 日结束,结束后土壤分为 2 份:一份放入 4 ℃冰箱中进行保存,用于微生物量碳的测定;另一份风干,风干后保留部分原状土,并将剩余土壤过 1.00,0.25 mm 筛,用于有机碳等指标的测定。试验指标于 2020 年 7 月 22 日开始陆续进行测定。

1.3 测定方法

土壤 pH:电位法(土水比为 1 : 2.5);交换性钠:乙酸铵—氢氧化铵交换—火焰光度法测定;阳离子交换量:乙酸钠—火焰光度法,根据上述 2 个指标计算土壤碱化度;土壤含盐量:质量法;土壤速效氮、磷、钾的测定采用常规分析方法^[19]。

土壤有机碳:重铬酸钾容量法—外加热法;土壤微生物量碳:氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法^[20];土壤活性有机碳:重铬酸钾—浓硫酸水合热法;土壤有机无机复合体参考 Edwards 等^[21]的方法。

土壤微生物商=土壤微生物量碳/ 土壤有机碳
Kos(有机碳氧化稳定性)=(土壤有机碳—易氧化有机碳)/ 易氧化有机碳

1.4 数据统计

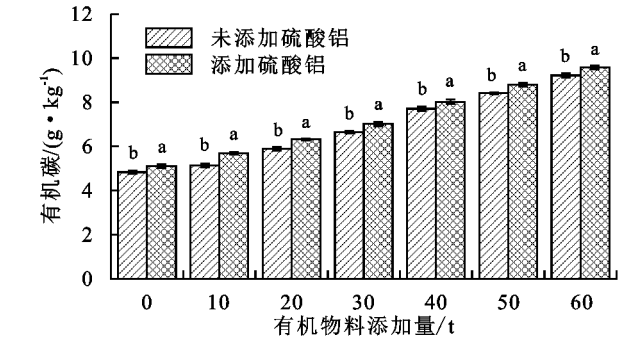
试验数据采用 Excel 2010 软件进行统计和计算,采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析处理,采用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳组成的影响

2.1.1 硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳含量的影响 由图 1 可知,施有机物料的各处理有机碳含量均显著增加,根据有机物料增加而不断上升,说明有机物料的施用能够显著提高土壤有机碳含量。在施用硫酸铝且有有机物料施用量相等时,所有处理均为施用硫酸铝的处理有机碳含量高,且各处理间差异性显著。与培养前供试土壤有机碳含量(4.94 g/kg)相比,未施用硫酸铝和有机物料的处理土壤有机碳含量

有所降低,这主要是由于在培养过程中,微生物活动有大量的有机酸、氨基酸、维生素等物质产生^[22],促使土壤中有机碳不断矿化分解,矿化的有机碳可被微生物所利用来维持其不断增加的活性,因为没有外源碳作为补充,使微生物仅能分解少部分原始土壤中的有机碳所造成的。



注:图柱上方不同小写字母表示经多重比较检验在 $p<0.05$ 水平上达到显著水平。下同。

图 1 硫酸铝和有机物料对土壤有机碳含量的影响

2.1.2 硫酸铝和有机物料对盐碱土微生物量碳及土壤微生物商的影响 为了更准确地研究土壤肥力高低的变化,可以从微生物量碳的变化趋势入手^[23]。由图 2 可知,土壤微生物量碳含量显著增加,根据有机物料增加而不断上升,施用有机物料的处理提高幅度为 103.86%~360.24%。微生物量碳含量在有机物料施用量为 0~30 t 时显著增加;微生物量碳含量在有机物料施用量>30 t 时增长幅度开始减缓。这可能是因为施用有机物料会为微生物的生长提供充足的营养,但微生物种类繁多,在生长过程中可能会相互制约,影响微生物量的增加;此外,微生物的生长对其生存环境有很高的要求,尤其在盐碱土中更容易受限。

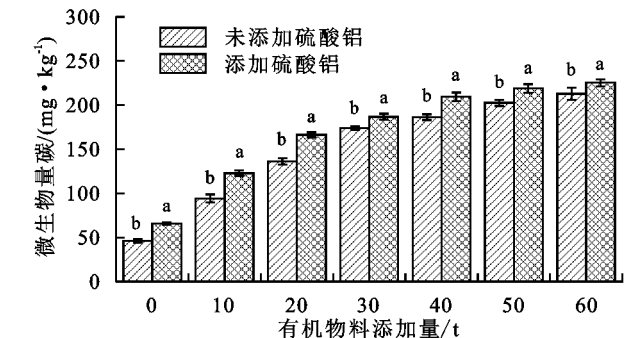


图 2 硫酸铝和有机物料对土壤微生物量碳含量的影响

添加硫酸铝使土壤 pH 降低,改变土壤环境,更能促进微生物生长。与未施用有机物料的处理相比,施用硫酸铝的处理提高幅度为 42.60%~387.58%,增长幅度明显高于单施有机物料的处理。说明硫酸铝的施用能够在施用有机物料的基础上进一步增加微生物量碳。其变化趋势与施用有机物料的处理变化趋势相同,呈先显著增加再缓慢增长的趋势。且在施用硫

酸铝且有有机物料施用量相同的条件下,与施用有机物料的处理相比,所有处理均为施用硫酸铝的处理微生物量碳含量高,各处理间差异性显著。

微生物商是土壤微生物量碳的值比土壤有机碳的值,其范围一般为 1%~5%,可作为反映碳素有效性的指标^[24]。在评价土壤健康变化方面具有重要作用。有研究^[25]表明,添加有机物可以提高土壤微生物商,但有机物料的不同,对微生物产生不同的影响。由图 3 可知,土壤微生物商值为 0.97%~2.92%。施用有机物料明显高于未施用有机物料的处理,显著提高了土壤微生物商值,提高幅度为 88.48%~193.68%。当有机物料施用量为 0~30 t 时,土壤微生物商值呈上升趋势;当有机物料施用量高于 30 t 时,土壤微生物商值开始小幅度下降,但是所有处理均高于未施用有机物料处理。

与未施用有机物料的处理相比,施用硫酸铝的处理提高幅度为 37.70%~202.32%。施用硫酸铝的处理,与施用有机物料的处理变化趋势相同,而且施用硫酸铝且施用有机物料的处理均高于施用有机物料的处理。出现这种现象的原因主要是因为施用有机物料对有机碳含量增加是无限的,但是微生物量不会无限增长,在此基础上施用硫酸铝更有利于土壤微生物商值的增长。硫酸铝的施用在有机物料施用量为 0~20 t 时反应最为明显。

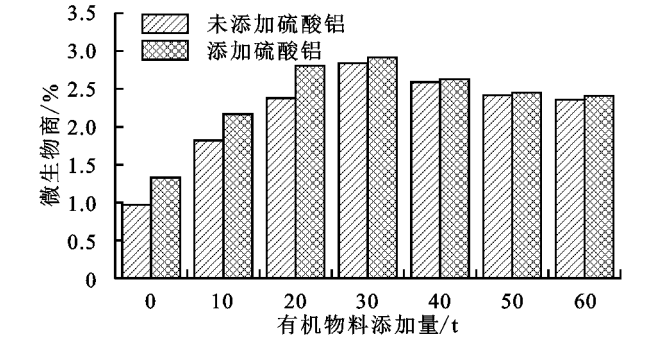


图 3 有机物料和硫酸铝对土壤微生物商的影响

2.1.3 硫酸铝和有机物料对盐碱土易氧化有机碳及 Kos 的影响 由图 4 可知,与未施用有机物料相比,施用有机物料的处理易氧化有机碳含量均显著增加,说明施用有机物料能够提高易氧化有机碳含量。施用有机物料较未施用有机物料的处理提高 4.42%~37.82%,且易氧化有机碳含量与有机物料施用量呈正相关关系($R^2=0.9840$)。施用硫酸铝及有机物料的处理提高幅度为 3.46%~27.32%,易氧化有机碳含量与施用硫酸铝、有机物料呈显著正相关关系($R^2=0.9900$)。在施用硫酸铝且有有机物料施用量相等的时候,所有处理均为施用硫酸铝的处理易氧化有机碳含量高,各处理间差异性显著。

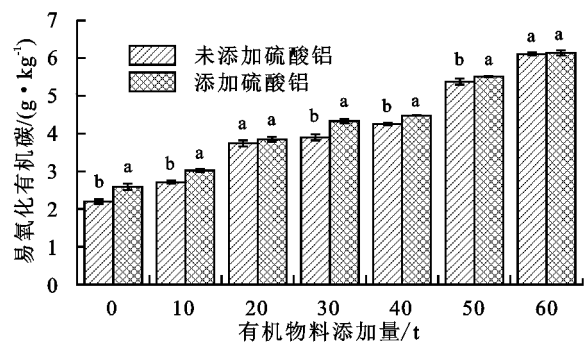


图 4 有机物料和硫酸铝对土壤易氧化有机碳含量的影响

根据土壤总有机碳和易氧化有机碳的平均值可以计算得出 Kos 值。土壤有机碳活性弱、氧化稳定性强说明 Kos 值越高;当 Kos 值低时,其有机碳活性及氧化稳定性的结果与 Kos 值高的结果相反^[26]。由图 5 可知,与未施用有机物料的处理相比,所有施用有机物料的处理 Kos 值均下降,整体趋势为 Kos 值在有机物料添加量在 0~20 t 时呈大幅下降趋势;Kos 值在 20~40 t 时有小幅上升趋势;Kos 值在 40~60 t 时呈下降趋势。说明有机物料施用在不同程度上能够降低土壤 Kos 值。施用硫酸铝的处理土壤有机碳 Kos 值也呈先大幅下降后小幅上升再下降的变化趋势,且 Kos 值在施用硫酸铝且有机物料施用量为 0 t 时下降幅度最大,Kos 值在施用硫酸铝且有机物料施用量为 30 t 时最低。在施用硫酸铝且有机物料施用量相同时,Kos 值大多数情况为施用硫酸铝的处理高。

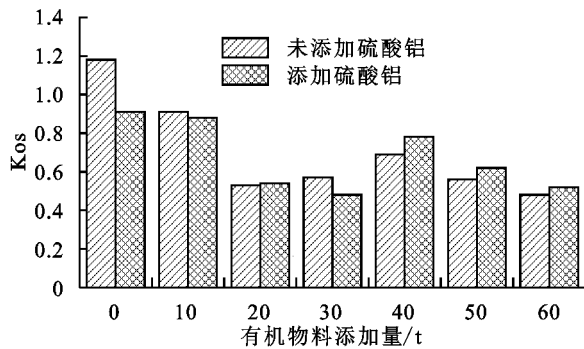


图 5 有机物料和硫酸铝对土壤有机碳 Kos 值的影响

2.2 硫酸铝和有机物料对盐碱土有机无机复合体及有机碳分布的影响

由表 1 可知,细砂粒级复合体占总体的 63.92%~65.45%,在整体中质量最高;黏粒级复合体占总体的 17.05%~17.87%;而粉粒级复合体不足整体的 7%。粗砂粒在复合体中含量较小,而且其多数会与土壤中颗粒有机碳结合,没有实质意义,所以没有对其进行分析。在施用有机物料的处理中,所有处理的大粒级(粉粒、细砂粒)复合体质量均呈上升趋势,只有小粒级(黏粒)复合体质量呈下降趋势。在黏粒级复合体

中,与未施用硫酸铝相比,施用硫酸铝的处理黏粒级复合体质量较低。在粉粒级复合体中,与未施用硫酸铝相比,施用硫酸铝且有机物料施用量<30 t 时,粉粒级复合体质量较高;施用硫酸铝且有机物料施用量>30 t 时,粉粒级复合体质量较低。在细砂粒级复合体中,其变化与粉粒级复合体的变化趋势相反。在施用硫酸铝且有机物料施用量相同条件下,只有细砂粒级复合体质量有所上升,黏粒、粉粒及粗砂粒级复合体质量与之相反。

由表 1 可知,各粒级复合体内有机碳含量由小粒级向大粒级方向减少,主要存在于黏粒部分,然后粉粒部分,最后是细砂粒部分。粗砂粒在复合体中含量较小,而且其多数与土壤中颗粒有机碳结合,没有实质意义,所以在表 1 中没有体现。各粒级复合体内的有机碳含量根据有机物料的施用量均呈上升趋势,而且在此基础上施用硫酸铝,还会进一步促进土壤中各粒级复合体内有机碳的积累。从有机碳贡献率得知,有机物料对不同粒级有机碳贡献率变化趋势不一样,黏粒级有机碳贡献率稍稍下降,这与黏粒级复合体质量变化趋势一致;粉粒级有机碳贡献率无明显变化,细砂粒级有机碳贡献率变化趋势与黏粒级有机碳贡献率趋势相反。在施用硫酸铝且有机物料施用量相同的条件下,不同粒级的变化趋势为以施用有机物料的处理作对照,施用了硫酸铝的处理土壤中大粒级(粉粒、细砂粒)有机碳贡献率较高,而小粒级(黏粒)有机碳贡献率较低。从有机碳损失量来说,均随有机物料施用量的增加呈上升趋势,且与未施用硫酸铝处理相比,施用硫酸铝处理有机碳损失量更高。上述结果表明,施用有机物料能够促进复合体由小向大聚集,增加土壤中大粒级复合体含量,提高各粒级复合体有机碳积累量,影响各粒级有机碳对土壤有机碳的贡献率,主要对黏粒和粉粒复合体影响较大。在施用硫酸铝且施用有机物料的条件下上述指标能够进一步提升。

3 讨论

3.1 硫酸铝和有机物料对土壤有机质组成的影响

本研究表明,土壤有机碳含量根据有机物料的施用呈上升趋势,土壤微生物量碳含量与有机碳变化趋势一致。因为有机物料在生长过程中提供充足的营养,可以促进微生物的生长,但微生物的种类繁多,而且对生存环境也有一定的要求,即使有机物施用量逐渐提高,微生物量也不会无限增长,而是逐渐稳定在一定水平,与朱孟龙等^[24]以稻草为添加物得出的研究结果相似。有机物料施用量为 30 t/hm²时,微生

物商值达到峰值,可以说明 30 t/hm²为有机物料最适添加量。土壤易氧化有机碳含量根据有机物料的施用也呈上升趋势,但是会使土壤 Kos 值降低,说明施用有机物料均能显著提升有机碳及活性有机碳,改变土壤现状,能够使土壤养分被植物更好地吸收利用,达到促进作物生长发育的目的。其中有机物料添

加量为 30 t/hm²时,易氧化有机碳变化最明显,Kos 值与其他处理相比较低。此外,作为盐碱土改良剂,硫酸铝能够显著降低土壤 pH^[17],对微生物生存环境有很好的改善作用。在施用硫酸铝且施用有机物料的条件下能够进一步提升有机碳及活性有机碳,同时能提高有机碳稳定性。

表 1 硫酸铝和有机物料的添加对土壤有机无机复合体及有机碳分布的影响

有机物料施用量/ (t·hm ⁻²)	硫酸铝施用量/ (t·hm ⁻²)	有机无机复合体组成/%				各粒级复合体有机碳含量/(g·kg ⁻¹)			各粒级复合体有机碳贡献率/%			有机碳 损失量/%
		<2 μm	2~20 μm	20~200 μm	>200 μm	<2 μm	2~20 μm	20~200 μm	<2 μm	2~20 μm	20~200 μm	
0	0	17.89a	6.02a	64.95a	6.58a	22.28a	7.62a	0.36a	82.96a	9.53a	4.86b	2.64b
	0.2	17.72b	6.60b	63.92b	7.27b	22.93b	8.26b	0.41a	80.03b	10.53b	5.18a	4.26a
10	0	17.70a	6.29a	65.45a	7.34a	22.59a	8.34a	0.38a	78.23a	10.01a	4.84b	6.92b
	0.2	17.58b	6.47b	65.22b	8.15b	23.80b	8.69b	0.43a	74.04b	10.13b	4.93a	10.90a
20	0	17.83a	6.41a	64.69a	7.44a	24.78a	9.19a	0.44a	74.17a	10.00a	4.83b	10.99b
	0.2	17.61b	6.37a	64.45b	8.00b	25.24b	10.44b	0.53b	70.33b	10.52b	5.40a	13.74a
30	0	17.68a	6.51a	65.18a	7.15a	27.96a	10.23a	0.54a	74.50a	10.12a	5.30b	10.07b
	0.2	17.55a	6.42b	65.19a	7.49b	27.85b	11.39b	0.66b	69.63b	10.33b	6.13a	13.92a
40	0	17.48a	6.56a	65.22a	6.85a	28.88a	11.96a	0.64a	65.48a	10.18a	5.41b	18.93b
	0.2	17.39b	6.44b	65.14a	7.24b	29.31b	12.98b	0.71b	63.55b	10.47b	5.77a	20.21a
50	0	17.45a	6.63a	65.31a	6.68a	29.97a	12.95a	0.73a	62.22a	10.22a	5.67b	21.89b
	0.2	17.32b	6.50b	65.24b	7.02b	30.49b	14.26b	0.82b	60.01b	10.53b	6.08a	23.38a
60	0	17.20a	6.75a	65.35a	6.52a	31.62a	14.14a	0.84a	58.99a	10.35a	5.95b	24.71b
	0.2	17.05b	6.67b	65.29a	6.86b	32.12b	15.19b	0.93b	57.17b	10.57b	6.34a	25.93a

3.2 硫酸铝和有机物料对土壤复合体及其有机碳的影响

在本试验中,施用有机物料使土壤中小粒级(黏粒)明显减少,而大粒级(粉、细砂粒)明显增加。说明施用有机物料能够促进土壤中的粒级由小向大聚集。从各粒级有机碳变化趋势来看,各粒级复合体有机碳含量均呈上升趋势。在土壤中施用硫酸铝后,由于 Al³⁺ 的水解,从而产生了其他离子——羟基铝离子,对土壤胶体起到了凝聚作用,从而使土壤微团聚体数量增加^[27]。本研究发现,与未施用硫酸铝处理相比,所有处理均为施用硫酸铝的处理黏粒级复合体质量少,而粉粒、细砂粒和粗砂粒级复合体质量增加;在有机物料施用量相同时,施用硫酸铝的处理各粒级复合体内有机碳含量进一步增加。以上结果都说明硫酸铝的施用对土壤胶体团聚有进一步的促进作用,还能够使各粒级复合体内有机碳含量进一步提高,这与赵兰坡等^[28]研究结果相一致。

4 结论

(1)施用有机物料能够显著提高有机碳及活性有机碳含量。在此基础上,施用硫酸铝能够进一步提高有机碳及活性有机碳含量。

(2)有机物料施用量为 30 t/hm²时,微生物商值达到峰值。硫酸铝的施用有利于提高土壤有机碳的稳定性。在有机物料施用量为 30 t/hm²时,Kos 值与其他处理相比最低。

(3)施用有机物料可以促进土壤中粒级由小向大聚集,同时使各粒级复合体内有机碳含量增加,增加大粒级复合体有机碳对土壤有机碳的贡献。施用硫酸铝能够进一步促进土壤中粒级由小向大聚集,同时使各粒级复合体内有机碳含量进一步增加。在有机物料施用量为 30 t/hm²时,可以明显看出各粒级变化。

(4)综上所述,可以说明 30 t/hm²为有机物料最适施用量。即在施用硫酸铝且有机物料施用量为 30 t/hm²时,能够有效提高盐碱土土壤肥力,改善土壤结构,能经济合理地改良培肥苏打盐碱地。

参考文献:

[1] 赵兰坡,王宇,冯君,等.松嫩平原盐碱地改良利用:理论与技术[M].长春:科学出版社,2013.

[2] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance [J].Global Change Biology, 2012, 18(6): 1781-1796.

[3] 张久明,匡恩俊,刘亦丹,等.有机肥替代不同比例化肥

- 对土壤有机碳组分的影响[J].麦类作物学报,2021,41(12):1534-1540.
- [4] Banwart S, Black H, Cai Z C, et al. Benefits of soil carbon: Report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop [J]. Carbon Management, 2014(2):185-192.
- [5] 冷雪梅,钱九盛,张旭辉,等.外源有机物添加对长期不同施肥处理下水稻土有机碳矿化的影响[J].南京农业大学学报,2022,45(1):103-112.
- [6] Janaina B C, Danilo I U, Pedro J F F, et al. CO₂ emission from soil after reforest ation and application of sewage sludge [J].Bragantia Campinas,2014,73(3):312-318.
- [7] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fractions through soil profiles [J].Soil Science Society of America Journal,2006,70(2):660-667.
- [8] Mclauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques [J].Soil Science Society of America Journal,2004,68(5):1616-1625.
- [9] Cookson W R, Abaye D A, Marschner P, et al. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure [J].Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(9):1726-1737.
- [10] 李菡,袁红,宋洪福,等.不同利用方式土壤有机碳及其组分研究进展[J].江西农业学报,2020,32(8):57-63.
- [11] 张哲,王邵军,李霁航,等.土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J].生态学报,2019,39(17):6257-6263.
- [12] 熊毅,陈家访.土壤胶体(第3册):土壤胶体的性质[M].北京:科学出版社,1990.
- [13] 秦都林,王双磊,刘艳慧,等.滨海盐碱地棉花秸秆还田对土壤理化性质及棉花产量的影响[J].作物学报,2017,43(7):1030-1042.
- [14] 温馨,红梅,张月鲜,等.有机物添加对碱化土壤有机碳库及土壤质量的影响[J].中国草地学报,2022,44(1):39-49.
- [15] 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.
- [16] 王宇,韩兴,赵兰坡,等.硫酸铝对苏打盐碱土化学性质及水稻产量的影响[J].吉林农业大学学报,2006,28(6):652-655,659.
- [17] 张鑫,赵兰坡,赵兴敏,等.秸秆和硫酸铝改良剂对苏打盐碱土吸附腐殖酸性能的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):308-314.
- [18] 杨祥波.改良剂与有机物料结合对新开碱地稻田土壤性状的优化[J].河南农业科学,2020,49(5):88-96.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [21] Edwards A P, Bremner J M. Dispersion of soil particles by sonic vibration [J].European Journal of Soil Science, 2010,18(1):47-63.
- [22] 陈恩凤,刘期松,邱凤琼,等.有机肥料优越性的研究(二)施用有机肥料对土壤肥力、微生物活动、作物产量的作用[J].土壤学报,1960,8(1):1-11.
- [23] 朱利霞,陈居田,徐思薇,等.生物炭施用下土壤微生物量碳氮的动态变化[J].中国农业科技导报,2021,23(8):193-200.
- [24] 朱孟龙,赵兰坡,赵兴敏,等.稻草和硫酸铝添加对苏打盐碱土活性有机碳及有机无机复合体的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):284-288.
- [25] 韩玮,申双和,谢祖彬,等.生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J].生态学报,2016,36(18):5838-5846.
- [26] 孙丰豪,潘付艳,张志春,等.生物炭炭配比施肥对栗钙土团聚体有机碳含量及其氧化稳定性的影响[J].青海大学学报,2021,39(2):42-48.
- [27] 赵兰坡,冯君,王宇.松嫩平原盐碱地种稻开发的理论与技术问题[J].吉林农业大学学报,2012,34(3):237-241.
- [28] 赵兰坡,王宇,马晶.吉林省西部苏打盐碱土改良研究[J].土壤通报,2001,32(增刊):91-96.