

赵兴敏, 刘楠, 郭欣欣, 等. 秸秆和硫酸铝对淡黑钙土有机矿质复合体及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):950–956.

ZHAO Xing-min, LIU Nan, GUO Xin-xin, et al. Effect of straw and aluminum sulfate on soil organic-mineral complex and organic carbon distribution in light Chernozem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 950–956.

秸秆和硫酸铝对淡黑钙土有机矿质复合体及有机碳分布的影响

赵兴敏¹, 刘楠¹, 郭欣欣², 王鸿斌¹, 隋标¹, 赵兰坡^{1*}

(1.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; 2.Faculty of Engineering and Green Technology, University Tunku Abdul Rahman, Kampar 31900)

摘要:以吉林省典型土壤淡黑钙土为研究对象, 采用室内恒温培养法研究在不同秸秆和硫酸铝添加量下, 淡黑钙土中有机矿质复合体的含量及有机碳在其中的分布, 探讨有机矿质复合体对淡黑钙土固碳的贡献。结果表明: 对于秸秆和硫酸铝添加的所有处理, 复合体含量均表现为 G_1 (钠分散组) $> G_0$ (水分散组) $> G_2$ (钠质研磨分散组); 与对照相比, 秸秆和硫酸铝添加使得淡黑钙土中 G_0 组复合体的含量降低, G_2 组复合体的含量明显上升, 而对 G_1 组复合体的含量影响不大。单位质量复合体中有机碳的含量大小表现为 $G_2 > G_0 > G_1$, G_2 组复合体中的有机碳含量最高(平均含量为 $95.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 约为单位质量 G_0 组和 G_1 组复合体中有机碳含量的 3 倍, G_0 组(平均含量为 $33.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)略高于 G_1 组(平均含量为 $32.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。秸秆和硫酸铝添加均有助于提高 G_0 组复合体中有机碳的含量; 而 G_1 组复合体有机碳含量的变化主要受秸秆添加量的影响, 随着秸秆添加量的增加, G_1 组复合体有机碳含量增加; 秸秆对 G_2 组复合体中有机碳含量的提高具有促进作用, 而硫酸铝的影响则相反。各组复合体对淡黑钙土固碳的贡献率取决于土壤中复合体的含量及单位质量复合体中有机碳的含量, 其对固碳贡献的大小顺序为 $G_1 > G_0 > G_2$; 有机矿质复合体($G_0 + G_1 + G_2$)质量仅占淡黑钙土质量的约四分之一, 但其对于淡黑钙土固碳的贡献却为 61.96%~73.56%。

关键词: 淡黑钙土; 秸秆; 硫酸铝; 有机矿质复合体; 土壤有机碳

中图分类号: X131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)05-0950-07 doi:10.11654/jaes.2016-1466

Effect of straw and aluminum sulfate on soil organic-mineral complex and organic carbon distribution in light Chernozem

ZHAO Xing-min¹, LIU Nan¹, GUO Xin-xin², WANG Hong-bin¹, SUI Biao¹, ZHAO Lan-po^{1*}

(1.College of Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Changchun 130118, China; 2.Faculty of Engineering and Green Technology, University Tunku Abdul Rahman, Kampar 31900, Malaysia)

Abstract: The typical light Chernozem in Jilin Province was selected for analyzing the distribution of soil organic-mineral complex and the content of organic carbon at different content levels of straw and aluminum sulfate. Furthermore, the contribution of soil organic-mineral complex to organic matter sequestration in light Chernozem was investigated via laboratory simulative incubation. The results showed that the order of organic-mineral complex content was G_1 (sodium dispersion group) $> G_0$ (water dispersion group) $> G_2$ (sodium and abrasive dispersion group) for all treatments with straw and aluminum sulfate addition. Compared with S_0Al_0 , the content of G_0 organic-mineral complex was decreased with straw and aluminum sulfate addition. The content of G_2 organic-mineral complex was increased significantly. However,

收稿日期: 2016-11-21

作者简介: 赵兴敏(1980—), 女, 黑龙江讷河人, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: zhaoxingmin0704@163.com

* 通信作者: 赵兰坡 E-mail: zhaolanpo12@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41403077); 公益性行业科研专项基金(201503116)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41403077); The Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of China(201503116)

straw and aluminum sulfate addition had little effect on the content of G_1 organic-mineral complex. The organic carbon content in the organic-mineral complex of unit mass followed the order of $G_2 > G_0 > G_1$. The organic carbon content in the G_2 complex was highest and the average content was $95.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was about three times the organic carbon content in the G_0 and G_1 complex. The organic carbon content in the G_0 complex was slightly higher than that of the G_1 complex (the average content was $32.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the average content was $33.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Straw and aluminum sulfate addition could increase the organic carbon content in the G_0 complex, and the change of organic carbon content in the G_1 complex was mainly affected by straw addition. With the straw amount increasing, the organic carbon content in the G_1 complex was increased. Straw addition played a positive role for increasing the organic carbon content in the G_2 complex, however, the effect of aluminum sulfate was the contrary. The contribution of each organic-mineral complex to the soil carbon sequestration in light Chernozem depended on the organic carbon content in the complex and the complex content in soil. The organic carbon sequestration content in each organic-mineral complex followed the order of $G_1 > G_0 > G_2$. The contribution ratio of organic-mineral complex ($G_0 + G_1 + G_2$) to organic carbon sequestration in the light Chernozem was $61.96\% \sim 73.56\%$.

Keywords: light Chernozem; straw; aluminum sulfate; organic-mineral complex; soil organic carbon

淡黑钙土是在温带半干旱季风气候区,冬季寒冷漫长、夏季温热短促的特殊气候和母质等条件下形成的一类特殊类型的土壤,是吉林省的主要土壤资源和重要的农牧业生产基地。其主要特征为腐殖质积累过程弱、含量低,碳酸盐积累过程强、含量高,因此其肥力效果相对较差^[1]。在农业生产中,提高淡黑钙土肥力的主要措施是向土壤中添加有机物料,通过有机物料的腐殖化,提高有机质含量^[2-4]。但单一施用有机物料不能有效降低淡黑钙土的碳酸盐含量和碱度。课题组在以往研究中发现,使用硫酸铝改良剂对降低苏打盐碱土的 pH 值,促进土壤胶体凝聚具有良好的作用^[5-6]。这是由于硫酸铝的水解产物多核羟基铝聚合物、溶胶氢氧化铝及无定形氢氧化铝通过阳离子键桥、氢键合和氢氧化物键桥等机制发挥其吸附固定腐植酸的“桥梁”作用。此外,硫酸铝在溶液中的物理絮凝作用也会促进腐植酸的吸附固定^[7]。关于硫酸铝对淡黑钙土的有机质提升作用已经开展了初步研究工作,发现秸秆和硫酸铝改良剂组合添加对于淡黑钙土有机碳的固定具有明显的促进作用,对 pH 值和碳酸盐含量具有降低作用,而对阳离子交换量有一定的提升作用^[8]。秸秆还田后,在适宜的土壤生物化学等作用下逐渐转化形成腐殖质,成为土壤的重要组分,能够提高土壤肥力,促进植物生长。土壤腐殖质与土壤矿物质结合形成有机矿质复合体,是土壤中比较活跃的组成部分,

对于土壤结构的形成、土壤水分和养分的保持与供应均具有重要的影响^[9-10]。根据胶散分级法,可将土壤有机矿质复合体依次分为水分散组(G_0)、钠分散组(G_1)和钠质研磨分散组(G_2)^[11]。由于秸秆和硫酸铝加入淡黑钙土后,这三组有机矿质复合体及其中分布的有机碳如何变化尚不明确,本文在已有研究工作基础上,深入探索在硫酸铝存在时秸秆经腐解后形成的有机质与土壤矿质的作用情况,进而从机理上阐明硫酸铝对淡黑钙土有机碳固定的贡献,以期为淡黑钙土有机质的快速提升,改良培肥新技术、新方法的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为淡黑钙土,于 2013 年 10 月 7 日在吉林省前郭县套浩太乡碱巴拉村($124^{\circ}40'58.47''\text{E}$, $44^{\circ}54'6.17''\text{N}$)玉米田采集土壤样品,采样深度为 0~20 cm,6 次重复。土样去除肉眼可见的秸秆等有机残体后风干,过 2 mm 筛备用。供试玉米秸秆为田间自然风干整株秸秆样品,于室内 30°C 烘干后去除杂物,粉碎并过 2 mm 筛。经分析玉米秸秆有机碳含量为 $425.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮为 $5.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N 为 80。供试硫酸铝改良剂为工业硫酸铝,主要成分为 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 。淡黑钙土的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试淡黑钙土的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the tested light Chernozem

有机碳 Organic carbon/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total phosphorus/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效氮 Available nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 Available phosphorus/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available potassium/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	碳酸钙 Calcium carbonate/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	阳离子交换量 CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
12.05	0.82	0.77	87.70	6.41	200.21	8.01	20.7	14.57

1.2 试验设计

试验共设置 16 个处理,其变量分别是土壤中添加的秸秆量和硫酸铝量(秸秆或硫酸铝质量占土壤质量的百分比),具体设计见表 2。恒温培养试验中,对于每个处理,按照表 2 的设定量依次向 400 g 风干淡黑钙土中加入秸秆和硫酸铝,混合均匀后,转移到 1300 mL 的塑料培养瓶中,调整含水量为 20%。培养过程中,由于蒸发和土壤的呼吸作用要消耗部分水分^[12],每隔 3 d 补充水分,保持恒定的含水量,温度恒定为 25 ℃。培养 135 d 后取出土壤样品,风干,分析土壤有机矿质复合体和其中的有机碳含量。

表 2 培养试验设计

Table 2 Design of incubation test

Al ₂ (SO ₄) ₃	玉米秸秆 Corn straw			
	0	0.5%	1.0%	1.5%
0	S ₀ Al ₀	S _{0.5} Al ₀	S _{1.0} Al ₀	S _{1.5} Al ₀
0.2%	S ₀ Al _{0.2}	S _{0.5} Al _{0.2}	S _{1.0} Al _{0.2}	S _{1.5} Al _{0.2}
0.4%	S ₀ Al _{0.4}	S _{0.5} Al _{0.4}	S _{1.0} Al _{0.4}	S _{1.5} Al _{0.4}
0.6%	S ₀ Al _{0.6}	S _{0.5} Al _{0.6}	S _{1.0} Al _{0.6}	S _{1.5} Al _{0.6}

1.3 测试分析方法

土壤有机矿质复合体组成测定:G₀ 组复合体的

提取参照陈家坊等^[13]方法,分离土壤中水分散组复合体;G₁ 组复合体的提取参照傅积平等^[14]改进方法;G₂ 组复合体提取采用 Edwards 等^[15]改进方法。各组所得的悬浊液均用稀硫酸聚沉,再用酒精洗涤离心,湿样经风干后称重,并计算各组复合体的含量。土壤及复合体中有机碳含量的测定采用重铬酸钾外加热法^[16]。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2013 和 Origin 8.0 软件进行数据统计分析,采用 SPSS 软件进行差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 秸秆和硫酸铝添加对淡黑钙土各组复合体含量的影响

表 3 列出了秸秆和硫酸铝添加后土壤各组复合体的绝对含量、相对含量以及对比情况。对单位质量淡黑钙土中各组复合体的含量分析发现:固定秸秆添加量时,随着硫酸铝添加量的增加,G₀ 组复合体含量依次降低;固定硫酸铝添加量时,随着秸秆添加量的增加,G₀ 组复合体含量整体上呈降低趋势。这表明,秸秆和硫酸铝添加使得淡黑钙土中 G₀ 组复合体的含量降低。因为 G₀ 组复合体是游离的矿质颗粒和小于 10 μm 微团聚体的混合物^[17],硫酸铝和秸秆添加有利

表 3 秸秆和硫酸铝添加对淡黑钙土各级有机矿质复合体含量的影响

Table 3 Effect of straw and aluminum sulfate addition on the concentration of each organic-mineral complex in light Chernozem

土壤处理 Soil treatment	单位质量土壤各组复合体含量/g·kg ⁻¹ Content of each complex in unit soil				各组复合体占复合体总量的百分数/% Percentage of each complex			各组复合体的含量比/% Ratios of content of each complex		
	G ₀	G ₁	G ₂	G ₀ +G ₁ +G ₂	G ₀	G ₁	G ₂	G ₀ /G ₁	G ₀ /G ₂	G ₁ /G ₂
S ₀ Al ₀	63.3a	159.7b	7.1d	230.1	27.5	69.4	3.1	0.4	8.9	22.3
S ₀ Al _{0.2}	62.3b	167.5a	9.9c	239.7	26.0	69.9	4.1	0.4	6.3	17.0
S ₀ Al _{0.4}	58.2c	170.0a	11.2b	239.4	24.3	71.0	4.7	0.3	5.2	15.2
S ₀ Al _{0.6}	57.7c	164.3a	12.8a	234.9	26.1	68.5	5.3	0.4	4.5	12.8
S _{0.5} Al ₀	63.3a	166.8a	8.3c	238.4	26.6	70.0	3.5	0.4	7.6	20.1
S _{0.5} Al _{0.2}	62.0a	164.2a	11.0b	237.2	26.2	69.2	4.6	0.4	5.7	15.0
S _{0.5} Al _{0.4}	60.8ab	166.7a	12.2b	239.7	26.2	69.2	4.6	0.4	5.0	13.7
S _{0.5} Al _{0.6}	57.8b	165.8a	14.3a	237.9	26.2	69.2	4.6	0.3	4.0	11.6
S _{1.0} Al ₀	63.9a	161.4c	8.7d	234.0	27.9	68.4	3.7	0.4	7.3	18.5
S _{1.0} Al _{0.2}	60.8b	167.7a	13.1c	241.5	24.4	70.1	5.5	0.4	4.6	12.8
S _{1.0} Al _{0.4}	60.7b	164.8b	12.1b	237.5	26.3	68.7	5.0	0.4	5.0	13.7
S _{1.0} Al _{0.6}	59.6b	166.0ab	14.3a	239.9	24.9	69.2	6.0	0.4	4.2	11.6
S _{1.5} Al ₀	62.3a	166.3a	9.2c	237.8	25.6	70.6	3.8	0.4	6.7	18.0
S _{1.5} Al _{0.2}	59.6b	167.1a	14.1b	240.8	24.1	70.0	5.9	0.4	4.2	11.9
S _{1.5} Al _{0.4}	59.7b	161.3b	14.5ab	235.5	25.3	68.5	6.2	0.4	4.1	11.1
S _{1.5} Al _{0.6}	57.5b	162.9b	14.9a	235.3	24.4	69.2	6.3	0.4	3.9	10.9

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different small letters indicated significant difference among treatments in the same column data at 0.05 level. The same below.

于大团聚体而非小团聚体的形成^[5-6]。对于只添加秸秆的 4 组处理 S_0Al_0 、 $S_{0.5}Al_0$ 、 $S_{1.0}Al_0$ 和 $S_{1.5}Al_0$, G_0 组复合体含量分别为 63.3、63.3、63.9、62.3 $g \cdot kg^{-1}$, 没有显著差异; 而对于只添加硫酸铝的 4 组处理 S_0Al_0 、 $S_0Al_{0.2}$ 、 $S_0Al_{0.4}$ 和 $S_0Al_{0.6}$, G_0 组复合体含量分别为 63.3、62.3、58.2、57.7 $g \cdot kg^{-1}$, 呈现明显的下降趋势, 其中只有后两组差异不显著, 其余各组间差异显著。说明硫酸铝添加是造成 G_0 组复合体含量降低的重要原因。 G_2 组复合体含量随着硫酸铝添加量的增加明显提高, 随着秸秆添加量的增加也整体呈现显著上升的趋势, 即秸秆和硫酸铝添加使得淡黑钙土中 G_2 组复合体的含量显著提升, 且二者对于 G_2 组复合体含量增加的贡献基本相当。 G_1 组复合体是钙结合的复合体, 秸秆和硫酸铝添加对其影响不大, 并没有明显的规律性。已有研究也表明, 随秸秆添加量的增加, 土壤中非水稳性 G_0 组复合体含量减少, 水稳性 G_2 组复合体含量增加, 复合体由非水稳性向水稳性转化^[18-19], 随着硫酸铝加入量的增加, G_0 组非水稳性复合体含量减少^[20]。由于 G_2 组水稳性复合体是铁铝氧化物结合的复合体, 硫酸铝的添加有助于土壤中铁铝氧化物结合形式的复合体生成。与 G_2 组相比较, 虽然 G_0 和 G_1 变化幅度不大, 但从表 3 的统计分析结果可以看出, 大部分处理与其对照相比均达到了显著性差异。对于所有处理而言, 淡黑钙土中各组复合体的含量关系均为 $G_1 > G_0 > G_2$ 。由于 G_2 组复合体的绝对含量较少, G_2 组复合体相对于 G_0 组和 G_1 组的增幅较大。在复合体中, G_1 组复合体含量占绝对优势, 占复合体总量的 68.4%~71.0%, 其次为 G_0 组复合体占 24.1%~27.9%, G_2 组复合体仅占 3.5%~6.3%。这是由于淡黑钙土在成土过程中, 被淋溶的碳酸钙与土壤腐殖质中的胡敏酸结合, 从而使得 G_1 组复合体含量偏高^[21-22], 在本研究中 G_1/G_2 均大于 10。土壤复合胶体的形成与其稳定性有关, 并不完全取决于离子数量。铁铝键与钙键相比要稳定得多, 但在本研究中 G_2 组分含量相当低。这可能与土壤中实际情况存在一定的差异, 因为分级提取只是一种操作上的概念, 在将不同键合状态的腐殖质分离出来过程中存在一定的误差, 尤其在淡黑钙土呈碱性的环境下, 铁、铝氧化物大多以羟基的形式发生沉淀, 在很大程度上也制约着 G_2 组分的形成。

与 S_0Al_0 相比, 秸秆和硫酸铝添加使得各处理淡黑钙土复合体总量均增加。16 个处理培养 135 d 之后, 复合体总量变化幅度为 230.1~241.5 $g \cdot kg^{-1}$, 增幅为 1.69%~4.95%。无论在等量秸秆条件下改变硫酸铝

添加量, 还是在等量硫酸铝条件下改变秸秆添加量, 复合体总量的变化均没有呈现明显的规律性。复合体总质量占土壤质量的 23% 左右, 将近四分之一。

2.2 秸秆和硫酸铝添加后淡黑钙土各组复合体中有有机碳的含量

单位质量有机矿质复合体中有有机碳的含量反应了各级复合体对于有机碳的固持能力。秸秆和硫酸铝添加后有机碳在淡黑钙土复合体中的分布情况(单位质量复合体中有有机碳的含量)见表 4。由表 4 可以看出: 对于三组复合体有机碳含量整体而言, G_2 组复合体中的有机碳含量水平最高(平均含量为 95.92 $g \cdot kg^{-1}$), 约为单位质量 G_0 组和 G_1 组复合体有机碳含量的 3 倍; G_0 组和 G_1 组复合体中有有机碳的含量明显低于 G_2 组, 且 G_0 组(平均含量为 33.89 $g \cdot kg^{-1}$)略高于 G_1 组(平均含量为 32.25 $g \cdot kg^{-1}$)。已有研究也发现, 在各组复合体中, G_2 组复合体中有有机碳的含量最高^[23-24]。

在等量硫酸铝添加时, 随着秸秆添加量的增加, 各组复合体有机碳含量都呈现升高的趋势。秸秆添加不仅有助于提升土壤有机碳总量, 同时有助于土壤各组复合体中有有机碳含量的提升^[17]。在等量秸秆添加条件下, G_0 组复合体有机碳含量随着硫酸铝添加量的增加呈升高趋势, G_2 组复合体有机碳含量随着硫酸

表 4 秸秆和硫酸铝添加对有机碳在淡黑钙土复合体中分布的影响

Table 4 Effect of straw and aluminum sulfate addition on organic carbon distribution in organic-mineral complex

土壤处理 Soil treatment	单位质量复合体中有有机碳含量/ $g \cdot kg^{-1}$ Organic carbon content per kilogram of complex		
	G_0	G_1	G_2
S_0Al_0	32.48c	31.04b	96.36a
$S_0Al_{0.2}$	33.08b	31.73a	95.41b
$S_0Al_{0.4}$	33.55a	31.59ab	87.67c
$S_0Al_{0.6}$	33.66a	31.2ab	84.3d
$S_{0.5}Al_0$	32.96c	31.68bc	99.88a
$S_{0.5}Al_{0.2}$	33.33b	31.77b	96.58b
$S_{0.5}Al_{0.4}$	33.60a	32.25a	89.73c
$S_{0.5}Al_{0.6}$	33.66a	31.40c	89.67c
$S_{1.0}Al_0$	33.15d	32.38b	102.37a
$S_{1.0}Al_{0.2}$	34.30c	32.41b	99.96b
$S_{1.0}Al_{0.4}$	34.55b	32.91a	99.01c
$S_{1.0}Al_{0.6}$	34.80a	32.88a	90.49d
$S_{1.5}Al_0$	33.39b	32.31c	105.06a
$S_{1.5}Al_{0.2}$	35.14a	33.09b	101.40b
$S_{1.5}Al_{0.4}$	35.18a	34.07a	100.99b
$S_{1.5}Al_{0.6}$	35.48a	33.36b	95.88c

铝添加量的增加呈降低趋势,而 G_1 组复合体有机碳含量受硫酸铝的影响并不大,变化趋势也并不明显。由以上分析可知,秸秆和硫酸铝添加均有助于提高 G_0 组复合体中有机碳的含量;而 G_1 组复合体有机碳含量的变化主要受秸秆添加量的影响,随着秸秆添加量的增加, G_1 组复合体有机碳含量增加;秸秆对于 G_2 组复合体有机碳含量的提高有促进作用,硫酸铝的作用则相反。复合体中有机碳的含量与复合体中无机矿物含量、表面键合能力等有关,钙对于新鲜有机质具有很好的键合作用,而铝对胡敏酸和富里酸有很好的键合作用,对新鲜的有机残渣稳定作用较弱^[25]。从秸秆在土壤中达到完全腐殖化的时间看,本研究中大部分秸秆分解产生的有机质属于新鲜有机质,因而使得钙的键合作用突出, G_1 组分中有机质的含量提升较多。从复合体内部有机物和土壤矿质的键合作用看,从 G_0 组到 G_2 组腐殖质更为强烈的转变和缩合,稳定性更强,而 G_1 组和 G_2 组均属于水稳定性复合体,只是结合松紧程度不同而已。

2.3 秸秆和硫酸铝添加后各组复合体对淡黑钙土固有机碳的贡献

单位质量土壤中各组复合体有机碳的含量反映了其对于土壤固持有机碳的贡献水平(表5)。由表5

可以看出:分布在 G_1 组复合体中的有机碳含量远高于 G_0 组和 G_2 组,平均含量为 $5.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其主要原因是土壤中 G_1 组复合体含量高于其他两组;而 G_0 组和 G_2 组有机碳平均含量分别为 2.05 、 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,即分布在 G_0 组中的有机碳量高于 G_2 组。虽然单位质量 G_2 组中的有机碳含量高于 G_0 组和 G_1 组,但是由表3可知单位质量土壤中 G_2 组复合体的含量却远少于其他两组。这是导致单位质量土壤中 G_2 组复合体有机碳含量减少的原因。

对于单位质量的土壤而言,分布在 G_0 组中的有机碳含量随着硫酸铝添加量的增加呈降低趋势,而秸秆添加量的变化对其影响不明显。对于土壤中 G_1 组复合体有机碳的含量,少量添加秸秆(0.5%)和硫酸铝(0.2%)便可使其提高,继续增加秸秆和硫酸铝的投入量,对土壤固定有机碳的影响不再明显;淡黑钙土中 G_2 组复合体有机碳的含量,则随秸秆和硫酸铝改良剂添加量增加呈现增长的趋势。虽然表4中数据显示单位质量 G_2 组复合体中有机碳含量随硫酸铝添加量增加而减少,但 G_2 组复合体含量随着硫酸铝添加量增加的幅度大于其有机碳含量减少的幅度,导致单位土壤中 G_2 组复合体有机碳含量整体呈上升趋势。

从各组复合体对淡黑钙土固碳的贡献率看, G_1

表5 秸秆和硫酸铝添加后各组复合体对淡黑钙土固有机碳的贡献

Table 5 Contribution of each organic-mineral complex on carbon sequestration in light Chernozem after straw and aluminum sulfate addition

土壤处理 Soil treatment	A/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$				土壤总有机碳 Total carbon/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	B/%			
	G_0	G_1	G_2	$G_0+G_1+G_2$		G_0	G_1	G_2	$G_0+G_1+G_2$
S_0Al_0	2.06	4.96	0.69	7.71	10.77	19.13	46.05	6.41	71.59
$S_0Al_{0.2}$	2.06	5.31	0.94	8.32	10.81	19.06	49.12	8.70	76.87
$S_0Al_{0.4}$	1.95	5.37	0.98	8.30	10.86	17.96	49.45	9.02	76.43
$S_0Al_{0.6}$	1.94	5.13	1.08	8.15	10.89	17.81	47.11	9.92	74.84
$S_{0.5}Al_0$	2.09	5.29	0.83	8.20	11.48	18.21	46.08	7.23	71.52
$S_{0.5}Al_{0.2}$	2.07	5.22	1.06	8.34	11.52	17.97	45.31	9.20	72.48
$S_{0.5}Al_{0.4}$	2.04	5.38	1.09	8.51	11.67	17.48	46.10	9.34	72.92
$S_{0.5}Al_{0.6}$	1.94	5.21	1.29	8.44	11.74	16.52	44.38	10.99	71.89
$S_{1.0}Al_0$	2.12	5.22	0.89	8.24	12.04	17.61	43.36	7.39	68.36
$S_{1.0}Al_{0.2}$	2.08	5.43	1.31	8.83	12.18	17.08	44.58	10.76	72.41
$S_{1.0}Al_{0.4}$	2.10	5.42	1.19	8.71	12.31	17.06	44.03	9.67	70.76
$S_{1.0}Al_{0.6}$	2.02	5.46	1.29	8.78	12.46	16.21	43.82	10.35	70.39
$S_{1.5}Al_0$	2.08	5.37	0.97	8.42	13.10	15.88	40.99	7.40	64.27
$S_{1.5}Al_{0.2}$	2.09	5.53	1.43	9.05	13.17	15.87	41.99	10.86	68.72
$S_{1.5}Al_{0.4}$	2.10	5.50	1.46	9.06	13.26	15.84	41.48	11.01	68.33
$S_{1.5}Al_{0.6}$	2.04	5.43	1.43	8.91	13.29	15.35	40.86	10.76	66.97

注:A为单位质量土壤中各组复合体有机碳含量;B为各组复合体对土壤固碳的贡献率。

Note: A—Organic carbon of each complex per kilogram of soil; B—Contribution of each complex on soil carbon sequestration.

组复合体的贡献率最大(40.86%~49.45%),占淡黑钙土有机碳固定量的近一半; G_0 组复合体的贡献率次之,为15.35%~19.13%; G_2 组复合体的贡献率最小,仅为6.41%~11.01%。秸秆和硫酸铝添加降低了 G_0 组复合体对有机碳固定的贡献率,二者添加量越多,其降幅越大;单独加硫酸铝而不加秸秆时, G_0 组复合体对有机碳的贡献率略有提升,随着秸秆量的增加, G_0 组复合体的贡献依次降低。秸秆和硫酸铝的添加明显增加了 G_2 组复合体对淡黑钙土固定有机碳的贡献。添加秸秆和硫酸铝后,淡黑钙土三组复合体 $G_0+G_1+G_2$ 中有机碳总量与土壤有机碳总量对比发现,三组复合体中有机碳的总和小于土壤总有机碳的量,对淡黑钙土有机碳固定的贡献率为64.27%~76.87%,尚有约四分之一的有机碳不存在于有机矿质复合体中。由表3可知,三组复合体总质量占淡黑钙土质量的23.01%~24.15%,不到四分之一,而所含有机碳量却占总有机碳量的四分之三。这充分说明有机矿质复合体对土壤有机碳的固定和肥力提升具有重要的影响。在复合体的相关研究中,有专家提出有机矿质复合度这个概念,它是指有机矿质复合体中有机碳总量占土壤有机碳总量的百分数,该值越大,复合度越高^[17]。本研究结果表明,土壤中添加秸秆(S_0Al_0 、 $S_{0.5}Al_0$ 、 $S_{1.0}Al_0$ 和 $S_{1.5}Al_0$)会降低土壤的复合度,而加入硫酸铝(S_0Al_0 、 $S_0Al_{0.2}$ 、 $S_0Al_{0.4}$ 和 $S_0Al_{0.6}$)会提高土壤的复合度。可见硫酸铝添加有利于有机碳向稳定的土壤有机矿质复合体形式转化。

3 结论

(1)秸秆和硫酸铝的添加对淡黑钙土复合体组成及有机碳在其中的分布具有一定影响,所有处理的土壤中各组复合体含量关系均为 $G_1>G_0>G_2$ 。秸秆的添加使 G_0 组非水稳性复合体含量减少, G_2 组水稳性复合体含量增加;硫酸铝的添加使 G_0 组复合体减少, G_2 组复合体增加。添加秸秆和硫酸铝有助于 G_0 组非水稳性复合体向 G_2 组水稳性复合体转化,进而可以促进土壤形成稳定的团粒结构。

(2)在所有处理中,3组复合体都表现为 G_1 组中有机碳含量最少, G_2 组中有机碳含量最多。秸秆添加能够提高各组复合体的有机碳含量,而硫酸铝的添加导致 G_2 组复合体有机碳含量减少,但单位质量淡黑钙土中 G_2 组复合体中有机碳含量却有所升高。分布在淡黑钙土各组复合体中有机碳含量的大小顺序为 $G_1>G_0>G_2$,与土壤中各组复合体含量之间的大小关系

相同。

(3)从各组复合体对于淡黑钙土固碳的贡献率看, G_1 组复合体的贡献率最大,占淡黑钙土有机碳固定量的近一半, G_0 组复合体的贡献率次之, G_2 组复合体的贡献率最小。

参考文献:

- [1] 吉林土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1998: 165-184.
Soil and Fertilizer Station of Jilin Province. Jilin Province soil[M]. Beijing: Chinese Agriculture Publisher, 1998: 165-184.
- [2] 张雅洁, 陈晨, 陈曦, 等. 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2155-2161.
ZHANG Ya-jie, CHEN Chen, CHEN Xi, et al. Effects of wheat and rice straw returning on soil organic matter composition and content of different nitrogen forms in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2155-2161.
- [3] Zhao S C, Li K J, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216(15): 82-88.
- [4] Zhao X M, He L, Zhang Z D, et al. Simulation of accumulation and mineralization (CO_2 release) of organic carbon in chernozem under different straw return ways after corn harvesting[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 148-154.
- [5] 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(S1): 91-96.
ZHAO Lan-po, WANG Yu, Ma Jing. Improvement of soda-type saline-alkaline soil western Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(S1): 91-96.
- [6] 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.
ZHU Meng-long, ZHAO Lan-po, ZHAO Xing-min, et al. Effects of rice straw and aluminum sulfate on labile organic carbon and organo-mineral complexes in soda saline-alkaline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 284-288.
- [7] Takahashi T, Dahlgren R A. Nature, properties and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils[J]. *Geoderma*, 2016, 263(1): 110-121.
- [8] 刘楠, 赵兰坡. 添加玉米秸秆和硫酸铝对淡黑钙土化学性质的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 84-91.
LIU Nan, ZHAO Lan-po. Effects of adding straw and aluminum sulfate on chemical properties in light Chernozems[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 84-91.
- [9] Huang H L, Zeng G M, Tang L, et al. Effect of biodelignification of rice straw on humification and humus quality by *Phanerochaete chrysosporium* and *Streptomyces badius*[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, 61(4): 331-336.

- [10] Arcand M M, Knight J D, Richard E F. Differentiating between the supply of N to wheat from above and belowground residues of preceding crops of pea and canola[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(4): 563–570.
- [11] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
YAN Chang-sheng. Soil fertility research method[M]. Beijing: Agriculture Publisher, 1988.
- [12] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972–978.
CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972–978.
- [13] 陈家坊, 杨国治. 江苏南部几种水稻土的有机矿质复合体性质的初步研究[J]. 土壤学报, 1962, 10(2): 183–192.
CHEN Jia-fang, YANG Guo-zhi. Study on the properties of the organo-mineral colloidal complexes of some paddy soils in South Jiangsu, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1962, 10(2): 183–192.
- [14] 傅积平, 张敬森. 石灰性土壤微团聚体的分组分离及其特性的初步研究[J]. 土壤学报, 1963, 1(4): 382–395.
FU Ji-ping, ZHANG Jing-sen. A preliminary study on the separation and characteristics of micro aggregates in calcareous soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 1(4): 382–395.
- [15] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soil[J]. *Soil Science*, 1967, 18: 64–73.
- [16] 中国标准出版社. 中国林业标准汇编(营造林卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
China Standard Publisher. Assembly of chinese forestry standards; Volume of forest construction[M]. Beijing: China Standard Publisher, 1998.
- [17] 徐建民, 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 V. 胶散复合体组成和生成条件剖析[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 45–51.
XU Jian-min, YUAN Ke-neng. Study on organo-mineral complexes in soil; V. Distribution of organo-mineral complexes in zonal soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(1): 45–51.
- [18] 化党领, 张一平. 壤土不同施肥条件下土壤胶散复合体研究[J]. 土壤肥料, 1991(1): 9–12.
HUA Dang-ling, ZHANG Yi-ping. Study on soil organic-mineral complex in Loessial soil under different fertilizer conditions[J]. *Soil Fertilizer*, 1991(1): 9–12.
- [19] 党萍莉, 马跃华, 张一平. 不同施肥条件对壤土有机无机复合状况的影响[J]. 土壤肥料, 1994(3): 1–3.
DANG Ping-li, MA Yue-hua, ZHANG Yi-ping. Effects of different fertilization conditions on organic-mineral complex in Loessial soil[J]. *Soil Fertilizer*, 1994(3): 1–3.
- [20] 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): 652–659.
WANG Yu, HAN Xing, ZHAO Lan-po, et al. Effect of aluminum sulfate on chemical characteristics of soda alkali-saline soil and rice yield[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2006, 28(6): 652–659.
- [21] 王继红, 赵兰坡, 王宇, 等. 吉林省主要耕作土壤胶散复合体的组成特征[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(3): 72–77.
WANG Ji-hong, ZHAO Lan-po, WANG Yu, et al. Study on the composition of organic-mineral complex of major cultivated soil from Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2001, 23(3): 72–77.
- [22] Tyulin A F. The composition and structure of soil of organomineral gels and soil fertility[J]. *Soil Science*, 1937, 45: 343–357.
- [23] 杨彭年. 石灰性土壤有机矿质复合体及其团聚性的研究[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 144–153.
YANG Peng-nian. Studies on properties of organo-mineral complex and aggregate in calcareous soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(2): 144–153.
- [24] Inoue K, Zhao L P, Huang P M. Adsorption of humic substances by hydroxylaluminum- and hydroxylaluminosilicate-montmorillonite complexes[J]. *Soil Science*, 1990, 54(4): 1166–1172.
- [25] 熊毅. 土壤胶体(第一册)[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 343–344.
XIONG Yi. Soil colloids(Volume 1)[M]. Beijing: Science Press, 1983: 343–344.