

温晓兰,宋福如,石温慧,等. 有机硅功能肥对不同利用方式下土壤团聚性和抗蚀性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(5):218-224.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.05.035

# 有机硅功能肥对不同利用方式下土壤团聚性和抗蚀性的影响

温晓兰<sup>1</sup>, 宋福如<sup>2,3</sup>, 石温慧<sup>1</sup>, 宋利强<sup>2,3</sup>, 刘小粉<sup>1</sup>, 宋聚强<sup>2</sup>, 曹子库<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学,河北邯郸 056038; 2. 河北省硅谷农业科学研究院,河北邯郸 057151; 3. 河北硅谷肥业有限公司,河北邯郸 057151)

**摘要:**以河北省邯郸地区果园、荒草地和农田的土壤为试验对象,探讨土壤有机调理剂(AF)、颗粒复合肥(BF)和大量元素水溶肥(DF)等3种有机硅功能肥对土壤团聚体分布、稳定性及其抗蚀性的影响。采用湿筛法分离土壤水稳性团聚体,并以土壤平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(*D*)、土壤可蚀性因子(*K*)和分散率(*Dr*)为评价指标。结果表明,3种有机硅功能肥使供试土壤>0.25 mm水稳性团聚体含量均有所增加,其中经AF处理的土壤>2.00 mm水稳性团聚体含量均显著高于其他处理,经BF处理的土壤>0.25~2.00 mm水稳性团聚体含量也相对高于其他处理;与空白组对比,加入肥料的土壤稳定性和抗蚀性均显著提高,其中AF处理最利于果园土壤稳定性和抗蚀性提高,而BF处理最利于荒草地和农田的提高;相关性分析结果表明,果园土壤>0.25 mm团聚体含量几乎与各参数均呈显著正相关,与<0.05 mm团聚体含量呈显著负相关,而荒草地和农田土壤>0.25~2.00 mm团聚体含量与各参数均呈极显著正相关,与<0.25 mm团聚体呈极显著负相关。因此,土壤调理剂主要通过增加>2.00 mm水稳性团聚体含量,复合肥主要通过增加>0.25~2.00 mm水稳性团聚体含量,从而提高团聚体稳定性和抗侵蚀能力。研究结果为不同有机硅功能肥对土壤结构的改良提供了理论参考。

**关键词:**有机硅功能肥;土地利用方式;土壤团聚体组成;土壤团聚体稳定性;土壤抗蚀性

**中图分类号:**S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)05-0218-07

土壤团聚体是土壤结构的基本单位<sup>[1-2]</sup>,其数

量和分布反映了土壤结构的稳定性和抗蚀性<sup>[3-4]</sup>。土壤水肥气热等性质都与土壤团聚体的稳定性有关<sup>[5-6]</sup>,稳定的土壤结构既能保水、保肥、提高土壤质量、减少水土流失<sup>[7-8]</sup>,还利于植物生长和微生物活动<sup>[9]</sup>。研究表明,质量良好的土壤一般拥有更稳定的团聚体,因此,土壤团聚体稳定性被广泛作为评价土壤健康状况的重要指标<sup>[10-11]</sup>。土壤抗蚀性是指土壤抵抗水的分散和悬浮的能力<sup>[12]</sup>,与土壤团聚体稳定性密切相关,抗蚀性的大小主要由土粒间

收稿日期:2021-07-01

基金项目:河北省自然科学基金(编号:C2020402022、D2016402029);河北省青年拔尖人才支持计划(第三批);河北省梨产业技术体系土壤耕作与肥水调控岗位。

作者简介:温晓兰(1998—),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事土壤肥料方面的研究。E-mail:3474728633@qq.com。

通信作者:刘小粉,博士,教授,主要从事绿肥资源综合利用方面的研究。E-mail:liuxiaofenok@126.com。

[8]白永娟,徐炜南,常晓晓,等. 不同碳氮比及氮源对菇渣发酵的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2016,42(6):760-768.

[9]单洪涛,宫志远,张昌爱,等. 杏鲍菇渣降盐处理及降盐菇渣基质育苗试验[J]. 蔬菜,2017(10):56-59.

[10]郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:423-425.

[11]秦莉,沈玉君,李国学,等. 不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2668-2673.

[12] de Bertoldi M, Vallini G, Pera A. The biology of composting: a review [J]. Waste Management & Research, 1983, 1(2): 157-176.

[13]林志斌,严生仁,林碧英,等. 沸石和微生物菌剂对杏鲍菇菌渣堆肥品质的影响[J]. 亚热带农业研究,2016,12(4):254-259.

[14]夏金利,王岩,董春玲,等. 不同促腐菌剂对园林废弃物堆肥

理化性质和优势微生物群落的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(3): 551-560.

[15]郗丽娟,赵付江,韩晓倩,等. 不同添加物对菇渣发酵效果的影响[J]. 河北农业科学,2016,20(5):36-39,44.

[16]白永娟. 菇渣腐熟发酵条件及其在蔬菜育苗中的应用效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016:24-25.

[17]刘庆华,刘庆超,王奎玲,等. 几种无土栽培代用基质缓冲性研究初报[J]. 中国农学通报,2008,24(2):272-275.

[18]崔秀敏,王秀峰. 蔬菜育苗基质及其研究进展[J]. 天津农业科学,2001,7(1):37-42.

[19] Chong C. Experiences with the utilization of wastes in nursery potting mixes and as field soil amendments[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1999, 79(1): 139-148.

的胶结力及土粒和水的亲和力决定<sup>[13]</sup>。土壤学研究中,常采用湿筛法获得水稳性团聚体,并用平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)等指标衡量土壤团聚体稳定性<sup>[14-15]</sup>,用土壤可蚀性因子(K)和分散率(Dr)评价土壤抗蚀性<sup>[16-17]</sup>。

硅是作物有益营养元素,其氧化物含量占作物灰分的14.2%~61.4%<sup>[18]</sup>。美国加州大学早在1926年开始研制硅素肥料,并肯定了它的肥效<sup>[19]</sup>。我国内地的硅肥应用研究始于20世纪70年代中期,80年代后逐步实现了工业化生产和小面积示范、推广,在施用过程中,作物的产量和品质有明显提高,土壤生态环境也得到改善。有机硅功能肥是近几年兴起的一种新型肥料,具有综合的肥效作用,不仅能为植物提供养分、改善作物产品品质,还可以提高土壤质量<sup>[20]</sup>,因此得到广泛应用。目前,国内对有机硅功能肥在治理土壤盐碱化<sup>[21-22]</sup>和防治土壤重金属污染<sup>[23]</sup>方面的研究已广泛开展,但其对土壤团聚体性及抗蚀性的影响罕见报道。

因此,本试验以河北省邯郸市3种利用方式不同的土壤为研究对象,探讨有机硅功能肥对水稳性团聚体分布、稳定性及抗蚀性的影响,以期有机硅功能肥在土壤结构改良和水土保持方面的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验中3种利用方式不同的土壤的具体情况如下。

永年县河北工程大学试验基地果园土:土壤质地为沙壤,其中沙粒(>0.050~2.000 mm)占54.2%,粉粒(0.002~0.050 mm)占28.1%,黏粒(<0.002 mm)占12.9%,有机质含量为15.4 g/kg。

肥乡县康源农业园区荒草地土:土壤质地为粉壤,其中沙粒占3.2%,粉粒占73.1%,黏粒占20.2%,有机质含量为20.0 g/kg。

成安县三信农业园区种植夏玉米-冬绿肥的农田土:土壤质地为粉壤,其中沙粒占19.6%,粉粒占59.4%,黏粒占16.1%,有机质含量为14.5 g/kg。

试验所用3种有机硅功能肥由河北省硅谷农业科学研究院和河北硅谷肥业有限公司共同研发和生产,已在全国范围内推广应用。有机硅土壤调理剂(AF):氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)总含量

≥40%,有机质含量≥15%,黄腐酸含量≥3%,活性硅含量≥2%;有机硅大量元素水溶肥(DF):氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)总含量≥50%,硼(B)和锌(Zn)总含量≥0.3%;有机硅复合肥(BF):氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)含量均为18%。肥料详细配方为商业机密,此处不再详述。

### 1.2 试验设计

2019年10月采集3种不同利用方式土壤样品,取样深度为0~20 cm。用土钻采集5~8个点混合土样,除去肉眼可见的草根、石子等杂物,沿土壤自然裂缝轻轻掰碎直至全部过8 mm筛,风干。参考文献[24]进行湿筛法测定土壤团聚体,获得>2.00 mm、>0.25~2.00 mm、0.05~0.25 mm和<0.05 mm等4个粒级团聚体。具体步骤:称取约50 g土样,平铺于孔径自上而下为2、0.25、0.05 mm的套筛顶端,并放入经过不同处理的溶液中,快速湿润并静置5 min,随后垂直上下振荡5 min(团聚体湿筛机械参数:垂直上下振荡约25次/min;上下移动垂直距离为3.8 cm),之后把各级筛层上的土粒转移至已称质量的铝盒中,放进恒温60℃烘箱直至烘干,称质量并记录。每个土样均设置4个处理。CK:在4 000 mL清水中湿筛;AF:在土壤调理剂和清水体积比为1:50的4 000 mL溶液中湿筛;BF:在复合肥和清水体积比为1:50的4 000 mL溶液中湿筛;DF:在大量元素水溶肥料和清水体积比为1:50的4 000 mL溶液中湿筛。每个处理3次重复。

土壤平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)<sup>[25]</sup>、土壤分形维数(D)<sup>[26]</sup>计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^4 w_i}; \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^4 w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} \right). \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为粒级*i*团聚体的平均直径; $w_i$ 为粒级*i*团聚体的质量。

$$\left( \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}. \quad (3)$$

式中: $\bar{d}_i$ 是两相邻粒径*d<sub>i</sub>*和*d<sub>i+1</sub>*(*d<sub>i</sub>*>*d<sub>i+1</sub>*,*i*=1,2,3,4)的平均值; $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均值; $W(\delta < \bar{d}_i)$ 为大于*d<sub>i</sub>*的累计土粒质量; $W_0$ 表示土壤各粒级质量总和。以lg( $W_i/W_0$ )、lg( $\bar{d}_i/\bar{d}_{\max}$ )纵、横坐

标进行回归分析,可以得到斜率  $3-D$  的值,进而得到  $D$  的值。

土壤可蚀性因子 ( $K$ )<sup>[27]</sup> 和分散率 ( $Dr$ ) 计算公式如下:

$$K = 7.954 \times \{0.001\,7 + 0.049\,4 \times \exp[-0.5 \times (\frac{1.675 + \lg GMD}{0.698\,6})^2]\}。 \tag{4}$$

$$Dr = <0.05\text{ mm 微团聚体百分含量} / <0.05\text{ mm 机械组成百分含量} \times 100\%。 \tag{5}$$

1.3 数据处理和统计分析

试验数据用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 处理,图和表分别用 Sigmaplot 10.0 和 Excel 2019 制作。

2 结果与分析

2.1 有机硅功能肥对土壤水稳性团聚体分布的影响

由图 1 可以看出,与 CK 相比,AF、BF、DF 处理能显著增加果园土壤  $>0.25\text{ mm}$  水稳性大团聚体含量,同时显著减少  $<0.25\text{ mm}$  水稳性微团聚体含量。 $>2.00\text{ mm}$  团聚体含量在处理间表现为  $AF > BF > DF > CK$ ,其中 AF 处理分别为 BF、DF、CK 处理的 2.4、3.3、9.3 倍; $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  团聚体含量表现为  $DF > BF > AF > CK$ ,DF 处理分别是 AF、CK 处理的 1.2、1.5 倍; $0.05 \sim 0.25\text{ mm}$  和  $<0.05\text{ mm}$  水稳性团聚体含量在 4 个处理间表现趋势一致:CK 含量最高,3 个肥料处理间无显著性差异。由表 1 可以看出,  $>2.00\text{ mm}$  和  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  团聚体含量均与  $<0.05\text{ mm}$  团聚体含量呈显著负相关,  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  团聚体含量还与  $0.05 \sim 0.25\text{ mm}$  团聚体含量呈极显著负相关。因此,对于该试验果园土壤,AF 处理最利于  $>2.00\text{ mm}$  水稳性团聚体含量增加,而 DF 和 BF 处理最利于  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  水稳性团聚体含量增加;肥料的加入使  $>0.25\text{ mm}$  的大团聚体含量增加,同时  $<0.05\text{ mm}$  的团聚体含量减少,且  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  团聚体含量增加使  $0.05 \sim 0.25\text{ mm}$  团聚体含量减少,且二者相关性较强。

由图 2 可以看出,与 CK 相比,荒草地土壤 3 个肥料处理  $>0.25\text{ mm}$  水稳性大团聚体含量增加,其中  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  粒级团聚体含量显著增加;同时  $<0.25\text{ mm}$  水稳性微团聚体含量减少,其中  $<0.05\text{ mm}$  粒级团聚体含量显著减少。 $>2.00\text{ mm}$  团聚体含量在处理间表现为  $AF > DF > BF > CK$ ,其

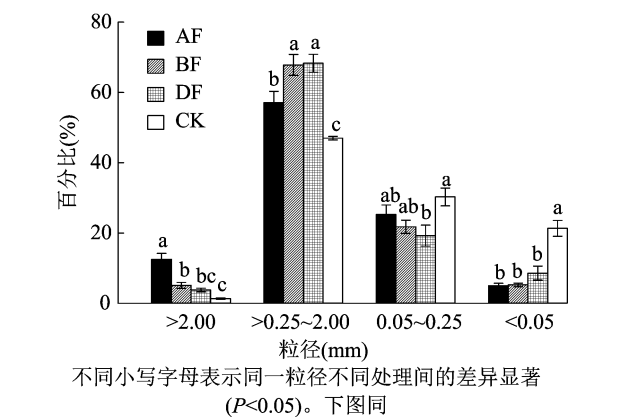


图1 不同肥料处理的果园土壤水稳性团聚体分布情况

粒径 (mm)	相关系数			
	> 2.00	>0.25 ~ 2.00	0.05 ~ 0.25	<0.05
>2.00	1.000			
>0.25 ~ 2.00	0.057	1.000		
0.05 ~ 0.25	-0.085	-0.872 **	1.000	
<0.05	-0.636 *	-0.706 *	0.450	1.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平上相关; \* 表示在 0.05 水平上相关。下同。

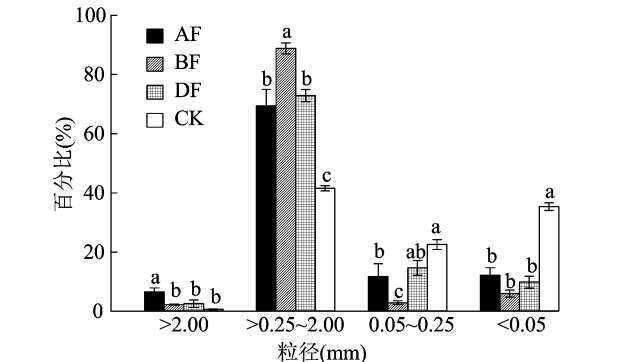


图2 不同肥料处理的荒草地土壤水稳性团聚体分布情况

中 AF 处理分别为 DF、BF、CK 处理的 2.5、2.9、8.9 倍;  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  团聚体含量在处理间表现为  $BF > DF > AF > CK$ ,其中 BF 处理分别为 DF、AF、CK 处理的 1.2、1.3、2.1 倍; $0.05 \sim 0.25\text{ mm}$  团聚体含量表现为  $CK > DF > AF > BF$ ,其中 CK 处理分别为 DF、AF、BF 处理的 1.5、1.9、7.8 倍;  $<0.05\text{ mm}$  团聚体含量以 CK 最高,3 个肥料处理间无显著差异。由表 2 可以看出,  $0.05 \sim 0.25\text{ mm}$  团聚体含量与  $<0.05\text{ mm}$  团聚体含量均与  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  团聚体含量呈极显著负相关,且  $0.05 \sim 0.25\text{ mm}$  团聚体含量与  $<0.05\text{ mm}$  团聚体含量呈极显著正相关。这说明,对于该试验荒草地土壤,在肥料溶解的状态下,AF 处理最利于  $>2.00\text{ mm}$  粒级的水稳性团聚体含量增加,而 BF 处理最利于  $>0.25 \sim 2.00\text{ mm}$  粒

级的水稳性团聚体含量增加;肥料的加入使 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量增加的同时,减少了 <0.25 mm 团聚体的含量,而 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体含量与 < 0.05 mm 团聚体含量同时减少。

表 2 荒草地土壤各粒级水稳性团聚体含量相关系数

粒径 (mm)	相关系数			
	>2.00	>0.25 ~ 2.00	0.05 ~ 0.25	<0.05
>2.00	1.000			
>0.25 ~ 2.00	0.319	1.000		
0.05 ~ 0.25	-0.328	-0.920 **	1.000	
<0.05	-0.474	-0.918 **	0.772 **	1.000

由图 3 可以看出,与 CK 相比,农田土壤 3 个肥料处理 >0.25 mm 水稳性大团聚体含量增加,其中 >0.25 ~ 2.00 mm 粒级团聚体含量显著增加;<0.25 mm 水稳性微团聚体含量显著减少。>2.00 mm 团聚体含量在处理间表现为 AF > BF > DF > CK,其中 AF 处理分别为 BF、DF、CK 处理的 2.5、4.3、5.9 倍;>0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量在处理间表现为 BF > DF > AF > CK,其中 BF 处理分别为 DF、AF、CK 处理的 1.1、1.2、3.5 倍;0.05 ~ 0.25 mm 团聚体含量以 CK 最高,3 个肥料处理间无显著差异;<0.05 mm 团聚体含量表现为 CK > AF > DF > BF,其中 CK 分别为 AF、DF、BF 处理的 3.8、4.0、8.4 倍。由表 3 可以看出,0.05 ~ 0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量均与 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量呈极显著负相关,且 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体含量与 <0.05 mm 团聚体含量呈极显著正相关。这说明,对于该试验农田土壤,AF 处理最利于 >2.00 mm 粒级水稳性团聚体含量增加,而 BF 处理最利于 >0.25 ~ 2.00 mm 粒级水稳性团聚体含量增加;肥料的加入使 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量增加的同时减少了 <0.25 mm 团聚体的含量,而 0.05 ~ 0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量同时减少。

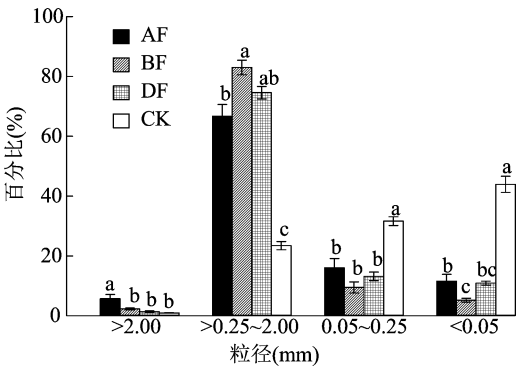


图3 不同肥料处理的农田土壤水稳性团聚体分布情况

表 3 农田土壤各粒级水稳性团聚体含量相关系数

粒径 (mm)	相关系数			
	>2.00	>0.25 ~ 2.00	0.05 ~ 0.25	<0.05
>2.00	1.000			
>0.25 ~ 2.00	0.307	1.000		
0.05 ~ 0.25	-0.353	-0.970 **	1.000	
<0.05	-0.396	-0.986 **	0.929 **	1.000

2.2 有机硅功能肥对土壤水稳性团聚体稳定性和抗蚀性的影响

由表 4 可以看出,肥料处理显著提高了果园土壤团聚体稳定性和抗蚀性。MWD 在处理间的顺序表现为 AF > BF > DF > CK,GMD 表现为 AF > BF > DF > CK,D 表现为 CK > DF > AF > BF。可蚀性指标 K 和 Dr 在处理间的趋势均表现为 CK > DF > BF > AF。总之,对该试验果园土壤而言,AF 处理最有利于提高土壤 MWD 和 GMD,同时也利于降低 K 和 Dr;而 BF 处理最有利于降低 D。因此,3 种肥料均有利于增强果园土壤水稳性团聚体稳定性和抗侵蚀能力,且 AF 处理效果最好。

表 4 不同肥料处理各土壤 MWD、GMD、D、K、Dr 的值

土地 利用方式	处理	MWD (mm)	GWD (mm)	D	K	Dr (%)
果园	AF	1.31a	0.68a	2.43b	0.05b	12.36b
	BF	1.05b	0.64a	2.42b	0.06b	12.85b
	DF	0.99b	0.58a	2.49b	0.06b	21.04b
	CK	0.65c	0.28b	2.68a	0.12a	52.15a
荒草地	AF	1.13a	0.64b	2.52b	0.06b	13.07b
	BF	1.12a	0.88a	2.31c	0.04b	6.41b
	DF	0.97a	0.60b	2.50b	0.06b	10.57b
	CK	0.55b	0.19c	2.76a	0.17a	37.88a
农田	AF	1.06a	0.58b	2.53b	0.06b	15.34b
	BF	1.06a	0.79a	2.36c	0.04b	6.92c
	DF	0.93a	0.58b	2.51b	0.06b	14.45bc
	CK	0.37b	0.11c	2.83a	0.24a	58.18a

注:相同土地利用方式同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

荒草地和农田土壤的 4 种处理中,MWD 的顺序表现为 AF > BF > DF > CK,GMD 表现为 BF > AF > DF > CK,D 表现为 CK > AF > DF > BF,K 和 Dr 均表现为 CK > AF > DF > BF。总之,对该试验荒草地和农田土壤而言,BF 处理最有利于提高土壤 GMD,同时也利于降低 K、Dr、D,而 AF 处理最有利于提高土壤 MWD,且荒草地和农田的参数在不同肥料处理间的大小顺序大致相似。总体上看,3 种肥料处理均

有利于增强荒草地和农田土壤水稳性团聚体稳定性和抗侵蚀能力,且 BF 处理效果最好。

2.3 土壤团聚体组成各参数间相关性分析

由表 5 可以看出,3 种不同利用方式下土壤 MWD 与 GMD 呈极显著正相关, $D$ 、 $K$  和  $D_r$  相互之间呈极显著正相关,MWD 和 GMD 均与  $D$ 、 $K$  和  $D_r$  呈极显著负相关。3 种土壤的 MWD 和 GMD 都与  $<0.25$  mm 粒径的团聚体呈负相关,与  $>0.25$  mm 粒级的团聚体呈正相关,而  $D$ 、 $K$ 、 $D_r$  与之相反;果园土

壤  $>0.25$  mm 和  $<0.05$  mm 粒径团聚体含量与各参数几乎均显著或极显著相关,而荒草地和农田土壤  $<2.00$  mm 粒径团聚体含量与各参数均呈极显著相关。说明有机硅功能肥加入后主要引起果园土壤  $>0.25$  mm 粒径团聚体含量增加和  $<0.05$  mm 粒径团聚体含量减少,荒草地和农田土壤则是  $>0.25 \sim 2.00$  mm 粒径团聚体含量增加和  $<0.05$  mm 粒径团聚体含量减少,这使其相应的 MWD 和 GMD 增大, $D$ 、 $K$  和  $D_r$  减小。

表 5 土壤水稳性团聚体组成与各参数间的相关性分析结果

土地 利用方式	参数	相关系数				各粒级土壤水稳性团聚体含量与各参数的相关系数			
		GMD	$D$	$K$	$D_r$	$>2.00$ mm	$>0.25 \sim 2.00$ mm	$0.05 \sim 0.25$ mm	$<0.05$ mm
果园	MWD	0.918 **	-0.852 **	-0.884 **	-0.857 **	0.916 **	0.453	-0.420	-0.857 **
	GMD	1.000	-0.971 **	-0.976 **	-0.947 **	0.690 *	0.749 **	-0.637 **	-0.947 **
	$D$		1.000	0.960 **	0.976 **	-0.612 *	-0.751 **	0.539	0.976 **
	$K$			1.000	0.970 **	-0.633 *	-0.788 **	0.628 *	0.970 **
	$D_r$				1.000	-0.636 *	-0.706 *	0.450	1.000 **
荒草地	MWD	0.932 **	-0.867 **	-0.952 **	-0.925 **	0.724 **	0.885 **	-0.824 **	-0.925 **
	GMD	1.000	-0.985 **	-0.941 **	-0.941 **	0.450	0.977 **	-0.919 **	-0.941 **
	$D$		1.000	0.914 **	0.931 **	-0.317	-0.977 **	0.889 **	0.931 **
	$K$			1.000	0.990 **	-0.525 *	-0.950 **	0.811 **	0.990 **
	$D_r$				1.000	-0.474	-0.946 **	0.772 **	1.000 **
农田	MWD	0.951 **	-0.923 **	-0.970 **	-0.961 **	0.613 *	0.940 **	-0.930 **	-0.961 **
	GMD	1.000	-0.994 **	-0.950 **	-0.964 **	0.391	0.978 **	-0.970 **	-0.964 **
	$D$		1.000	0.942 **	0.963 **	-0.310	-0.978 **	0.953 **	0.963 **
	$K$			1.000	0.995 **	-0.433	-0.980 **	0.932 **	0.995 **
	$D_r$				1.000	-0.396	-0.986 **	0.929 **	1.000 **

3 讨论

3.1 有机硅功能肥对土壤团聚体组成的影响

土壤团聚体组成是影响土壤稳定性、抗侵蚀和抗板结能力等土壤物理性质的重要因素<sup>[28]</sup>,不同粒径对土壤结构发挥的作用不同,有研究认为,土壤中大团聚体( $>0.25$  mm)所占比例越高,土壤结构越好<sup>[10,29]</sup>。有机硅功能肥是有机硅改性材料与化肥原料复合而成的一种肥料,同时有机硅材料可作为一种土壤改良剂,不仅具有调节土壤酸碱性,产生分散性和降低盐离子的活性等作用,且它的亲土性可促进土壤团聚体的形成<sup>[30]</sup>。谢国雄等在改良剂聚丙烯酰胺(PAM)、腐殖酸和 $\beta$ -环糊精对水稳性团聚体形成的影响中发现,PAM 更利于  $>5.00$  mm 团聚体形成,而腐殖酸更利于  $>0.25 \sim 2.00$  mm 团聚体形成<sup>[31]</sup>。本研究得出相似结果,AF 处理的 3 种

土壤  $>2.00$  mm 水稳性团聚体含量均显著高于其他处理,BF 处理的荒草地和农田土壤  $>0.25 \sim 2.00$  mm 粒径水稳性团聚体含量均显著高于其他处理。同时,DF 和 BF 处理的果园土壤  $>0.25 \sim 2.00$  mm 粒径团聚体含量间无显著差异且均显著高于其他处理。由此可知,3 种有机硅功能肥中,AF 处理产生的亲土性更利于土壤中  $>2.00$  mm 粒径团聚体含量增加,BF 处理的亲土性更利于  $>0.25 \sim 2.00$  mm 粒径团聚体含量提高。

3.2 有机硅功能肥对土壤稳定性和抗蚀性的影响

土壤平均质量直径和几何平均直径能从一定程度上描绘土壤团聚体的组成情况,分形维数反映了土壤水稳性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势<sup>[32]</sup>,土壤可蚀性因子和分散率能反映土壤对侵蚀外营力的敏感性,它们的值均与土壤团聚体组成相关<sup>[12,27]</sup>。一般情况下,大团聚体

( >0.25 mm)含量越多土壤结构越好,而 MWD 和 GMD 越大,*D*、*K* 和 *Dr* 越小,表明土壤团聚体稳定性越好且土壤抗侵蚀能力越强<sup>[27,33]</sup>。本研究中,MWD、GMD、*D*、*K* 和 *Dr* 各参数间呈显著相关,这说明,以上参数均能很好地反映团聚体的稳定性和可蚀性,这与刘新梅等的研究结果<sup>[10,34]</sup>相同。另外,将以上参数在不同处理间比较发现,经 AF 处理的果园土壤团聚体稳定性和抗蚀性效果最好,而荒草地和农田以 BF 处理效果最好,同时荒草地和农田虽然土地利用方式不同,但二者稳定性和抗蚀性参数在不同肥料处理间的值大小顺序大致相似。同时,有机硅功能肥以增加 >0.25 mm 团聚体含量来提高果园土壤稳定性和抗蚀性,而以增加 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量来提高荒草地和农田土壤稳定性和抗蚀性,可能和本试验供试的土壤质地不同有关。刘中良等研究也发现土壤团聚体的组成和分布受土壤质地影响<sup>[35]</sup>。由表 6 可知,在 AF 处理下,粒径 > 0.050 ~ 2.000 mm 的土壤颗粒含量与 >2.00 mm、0.05 ~ 0.25 mm 水稳性团聚体含量均呈显著正相关,且与 <0.05 mm 团聚体含量呈显著负相关,而 0.002 ~ 0.050 mm 颗粒含量则相反,<0.002 mm 颗粒含量与 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体呈

显著负相关;在 BF 处理下,>0.050 ~ 2.000 mm 土壤颗粒含量与 >2.00 mm、0.05 ~ 0.25 mm 水稳性团聚体含量均呈显著正相关,且与 > 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量呈显著负相关,而 0.002 ~ 0.050 mm 与 <0.002 mm 颗粒含量则相反;而在 DF 处理下,颗粒与团聚体无显著相关性。这说明,土壤沙粒( >0.050 ~ 2.000 mm)含量越高,越有利于 AF 处理增加 >2.00 mm 团聚体含量和 BF 处理增加 >2.00 mm 且减少 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量;土壤粉粒(0.002 ~ 0.050 mm)含量越高,越有利于 AF 处理减少 >2.00 mm 团聚体含量并使 BF 处理减少 >2.00 mm 团聚体含量且增加 > 0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量;土壤黏粒( <0.002 mm)含量越高,越有利于 BF 处理减少 >2.00 mm 团聚体含量且增加 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量。因此,土壤调理剂(AF)更适用于沙粒较多的土壤而 BF 适用于粉粒和黏粒较多的土壤。综上,果园土壤质地为沙壤土,沙粒较多,AF 处理有利于增加 >2.00 mm 团聚体含量,而荒草地和农田质地为粉壤土,粉粒和黏粒较多,BF 处理有利于增加 >0.25 ~ 2.00 mm 团聚体含量,从而提高土壤稳定性和抗侵蚀性且效果在 3 种有机硅肥料中最好。

表 6 土壤颗粒含量与水稳性团聚体含量的相关性分析结果

肥料	项目	土壤颗粒含量与各级土壤水稳性团聚体含量之间的相关系数			
		>2.00 mm	>0.25 ~ 2.00 mm	0.05 ~ 0.25 mm	<0.05 mm
土壤调理剂 (AF)	>0.050 ~ 2.000 mm 土壤颗粒含量	0.746 *	-0.653	0.756 *	-0.730 *
	0.002 ~ 0.050 mm 土壤颗粒含量	-0.752 *	0.654	-0.756 *	0.733 *
	<0.002 mm 土壤颗粒含量	-0.620	0.608	-0.725 *	0.652
复合肥 (BF)	>0.050 ~ 2.000 mm 土壤颗粒含量	0.827 **	-0.930 **	0.961 **	-0.205
	0.002 ~ 0.050 mm 土壤颗粒含量	-0.831 **	0.930 **	-0.961 **	0.603
	<0.002 mm 土壤颗粒含量	-0.719 *	0.881 **	-0.932 **	0.253
大量元素水溶肥 (DF)	>0.050 ~ 2.000 mm 土壤颗粒含量	0.436	-0.534	0.518	-0.258
	0.002 ~ 0.050 mm 土壤颗粒含量	-0.444	0.540	-0.523	0.262
	<0.002 mm 土壤颗粒含量	-0.280	0.415	-0.408	0.175

4 结论

在土壤团聚体的组成上,3 种有机硅功能肥中,土壤调理剂(AF)更利于土壤 >2.00 mm 粒径团聚体含量增加,而复合肥(BF)更利于 > 0.25 ~ 2.00 mm 粒径团聚体含量提高。

在土壤团聚体的结构改良上,3 种有机硅功能肥与 CK 相比,均能一定程度提高土壤团聚体稳定性和抗蚀性,但土壤的机械组成会影响有机硅功能

肥促进不同粒径水稳性团聚体的形成,其中土壤调理剂(AF)最利于沙粒含量较高的沙壤土改良,而复合肥(BF)最利于粉粒和黏粒含量较高的粉壤土改良。可见,有机硅功能肥对土壤结构的改善有一定成效,且受土壤质地影响很大,但其对土壤肥力的影响仍需长期进一步研究。

参考文献:

[1] 刘 艳,马茂华,吴胜军,等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究

- 进展与展望[J]. 土壤,2018,50(5):853–865.
- [2] 朱利霞,陈志鹏,任晓东,等. 河南周口市杨树和女贞林地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版),2020,38(3):247–252.
- [3] Li L, Yuan Z R, Li F C. Changes in soil aggregates composition stabilization and organic carbon during deterioration of alpine grassland[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science,2019,237(3):032068.
- [4] Lal R, Shukla M K. Principles of soil physics[J]. New York: Marchel Dekker Inc.,2004:16–17.
- [5] 周芸,李永梅,范茂攀,等. 有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体及玉米产量和品质的影响[J]. 作物杂志,2019(4):125–132.
- [6] 刘哲,孙增慧,吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(8):1119–1128.
- [7] 周世璇,李鹏,张伟,等. 黄土高原小流域不同生态建设措施下土壤水稳性团聚体及其全氮分布特征[J]. 水土保持学报,2021,35(3):119–126,134.
- [8] 高 强,宓文海,夏斯琦,等. 长期不同施肥措施下黄泥田水稻土团聚体组成、稳定性及养分分布特征[J]. 河南农业科学,2021,50(6):70–81.
- [9] 李彦,李廷亮,焦欢,等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物特性影响研究概况[J]. 山西农业科学,2018,46(3):466–470.
- [10] 刘新梅,田剑,张昊,等. 改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(1):326–333,355.
- [11] 杨鸿,李成学,杨苍玲,等. 施用有机肥对土壤团聚体的影响研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究),2017,2(11):28–32.
- [12] 李彦,谷会岩,陈月明. 植被细根对典型黑土土壤抗蚀性的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(7):81–85.
- [13] 王向栋,戴全厚,李翠莲,等. 草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性变化[J]. 水土保持研究,2017,24(3):13–18,23.
- [14] 陈奇,刘育红,魏卫东. 退化紫花针茅草原土壤团聚体稳定性分析[J]. 环境科学与技术,2019,42(6):35–43.
- [15] 王勇,李富程,汪璇,等. 聚丙烯酰胺对紫色土坡地耕作位移及土壤结构的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(4):51–56.
- [16] 冯克义. 我国土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水利水电技术,2019,50(增刊2):225–228.
- [17] 魏慧,赵文武,王晶. 土壤可蚀性研究述评[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2749–2759.
- [18] 刘丽君,黄张婷,孟赐福,等. 中国不同生态系统土壤硅的研究进展[J]. 土壤学报,2021,58(1):31–41.
- [19] 有机硅功能肥助力破解盐碱土壤难题[J]. 有机硅材料,2020,34(1):52.
- [20] 冯元琦. 硅肥:土壤不可或缺[J]. 中国石油和化工,2001(1):33–35,57.
- [21] 我国有机硅功能肥治理盐碱地技术达国际领先水平[J]. 农业科技与信息,2020(6):79.
- [22] 徐晓磊. 有机硅功能肥盐碱地改良结硕果[J]. 中国农资,2019(49):13.
- [23] 徐晓磊. 有机硅功能肥防治土壤重金属污染担大任[J]. 中国农资,2019(50):15.
- [24] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [M]//SSSA book series. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018:425–442.
- [25] Mebius L J. A rapid method for the determination of organic carbon in soil[J]. Analytica Chimica Acta,1960,22:120–124.
- [26] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896–1899.
- [27] 张钦,于恩江,林海波,等. 连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征[J]. 水土保持研究,2019,26(2):9–16.
- [28] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3):1042–1049.
- [29] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):340–347.
- [30] 徐晓磊. 硅谷化工:用科技的力量书写时代传奇[J]. 中国农资,2019(增刊3):7.
- [31] 谢国雄,季淑枫,孔樟良,等. 改良剂对粉砂质涂地土壤水稳定性团聚体形成和养分供应能力的影响[J]. 农学学报,2015,5(1):46–50.
- [32] 朱经伟,张云贵,李志宏,等. 不同土壤改良剂对整治烟田土壤团聚体组成的影响[J]. 南京农业大学学报,2018,41(2):341–348.
- [33] 张秀芝,李强,高洪军,等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(6):1214–1223.
- [34] 王志强,刘英,杨文亭,等. 稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 土壤学报,2018,55(5):1143–1155.
- [35] 刘中良,宇万太,周桦,等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤,2011,43(5):720–728.