

# 五台山土壤水稳性团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 分布特征

李雄飞<sup>1,2</sup>, 刘奋武<sup>1,2</sup>, 樊文华<sup>1,2</sup>

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801)

**摘要:** 以五台山垂直带土壤为研究对象,按照垂直分布从高到低依次对亚高山草甸土(A)、山地草甸土(B)、棕壤(C)、淋溶褐土(D)和石灰性褐土(E)进行采集,研究土壤本身及各土壤 $>2$ 、 $2\sim0.25$ 、 $0.25\sim0.053$ 、 $<0.053$  mm水稳性团聚体钙键合有机碳(Ca—SOC)和铁铝键合有机碳(Fe(Al)—SOC)的分布特征。结果表明:从A到E,各土壤Ca—SOC的含量没有明显变化趋势,而Fe(Al)—SOC的含量呈先升高后降低的趋势。随着团聚体粒径的减小,A的Ca—SOC和Fe(Al)—SOC含量变化趋势相反(前者先升高后降低,后者先降低后升高),B的Ca—SOC和Fe(Al)—SOC含量呈先降低后升高的趋势,D的Ca—SOC和Fe(Al)—SOC含量变化趋势与B相反,表现为先升高后降低;此外,C的Ca—SOC和Fe(Al)—SOC含量逐渐减小,而E的Ca—SOC和Fe(Al)—SOC含量逐渐增加。相关性分析表明,各土壤及 $>2$  mm团聚体Fe(Al)—SOC与土壤有机碳含量之间呈显著正相关,相关系数分别为 $r_{\text{土壤}}=0.898$  ( $P<0.05$ ),  $r_{>2\text{ mm}}=0.978$  ( $P<0.01$ )。各土壤及团聚体中Fe(Al)—SOC的含量明显大于Ca—SOC的含量,而且 $2\sim0.25$  mm和 $0.25\sim0.053$  mm团聚体Ca—SOC和Fe(Al)—SOC含量间都呈显著正相关。因此,五台山各土壤铁铝键的键合能力以及铁铝复合体的稳定性均高于Ca—SOC,且土壤和各级团聚体Fe(Al)—SOC的含量及分配比例明显高于Ca—SOC。

**关键词:** 五台山; 水稳性团聚体; 钙键合有机碳; 铁铝键合有机碳

**中图分类号:** S152.4; S153.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)02-0198-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.029

## Distribution Characteristics of Ca-SOC and Fe(Al)-SOC in Soil Water-stable Aggregates in Wutai Mountain

LI Xiongfei<sup>1,2</sup>, LIU Fenwu<sup>1,2</sup>, FAN Wenhua<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

**Abstract:** In this study, the vertical distributed soils from Wutai Mountain were used as the object, and the subalpine meadow soil (A), mountain meadow soil (B), brown soil (C), leached cinnamon soil (D) and calcareous cinnamon soil (E) were collected from high to low according to the vertical distribution. The distribution characteristics of Ca—SOC and Fe(Al)—SOC in soils and all level water-stable aggregates ( $>2$  mm,  $2\sim0.25$  mm,  $0.25\sim0.053$  mm and  $<0.053$  mm) were analyzed. The results showed that: From A to E, the content of Ca—SOC in soils didn't change significantly, while the content of Fe(Al)—SOC increased firstly and then decreased. With the decrease of aggregates' particle size, the change trend of Ca—SOC and Fe(Al)—SOC's content in A was opposite (the former increased firstly and then decreased, the latter decreased firstly and then increased), and decreased firstly and then increased in B. Also, the change trend of Ca—SOC and Fe(Al)—SOC's content in D was opposite to that of B, which was increased firstly and then decreased. In addition, the Ca—SOC and Fe(Al)—SOC's content in C decreased gradually, while increased gradually in E. The correlation analysis showed that the soils and  $>2$  mm aggregates had a significant positive correlation between Fe(Al)—SOC and TOC, the correlation coefficient were  $r_{\text{soil}}=0.898$  ( $P<0.05$ ) and  $r_{>2\text{ mm}}=0.978$  ( $P<0.01$ ). The content of Fe(Al)—SOC in soils and all level aggregates was significantly higher than that of Ca—SOC, and the contents of Ca—SOC and Fe(Al)—SOC in  $2\sim0.25$  mm and  $0.25\sim0.053$  mm aggregates were significantly positive correlated. Therefore, in Wutai mountain soil, the bonding ability of Fe—Al bond and the stability of Fe—Al complex were higher than Ca—SOC, besides, the content and distribution ratio

收稿日期: 2017-10-17

资助项目: 山西省科技攻关项目(20120313011-1)

第一作者: 李雄飞(1990—),男,山西大同人,硕士研究生,主要从事土壤生态研究。E-mail: 670485307@qq.com

通信作者: 樊文华(1962—),男,河北井陉人,博士,教授,主要从事土壤生态和土壤质量研究。E-mail: fwh012@163.com

of Fe(Al)—SOC in soil and all level aggregates were significantly higher than that of Ca—SOC.

**Keywords:** Wutai Mountain; water-stable aggregate; Ca—SOC; Fe(Al)—SOC

团聚体是土壤结构的重要组成部分,在维持土壤肥力、改良土壤质量和生态功能调节方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>,它不仅是评判土壤健康状况的主要指标,而且在探究土壤内部理化性质以及植物营养供给方面也发挥着举足轻重的作用,例如微团聚体的养分储备能力强,而大团聚体的养分供应能力强<sup>[3-4]</sup>。团聚体内部的有机质可以为植被生长提供碳源,维持土壤的物理结构,直接影响土壤肥力及作物产量的高低。但是,粗团聚体中有机质受到的是物理保护,有机碳易发生分解<sup>[5]</sup>,而在土壤矿物质化学保护下的有机碳却不易发生分解,如 Fe/Al 氧化物对新积累的碳的吸附有利于碳的固持和稳定<sup>[6]</sup>。钙键合态有机碳(Ca—SOC)和铁铝键合态有机碳(Fe(Al)—SOC)都是以金属离子为键桥的有机矿质复合体,其中 Ca—SOC 是外圈配合产物,Fe(Al)—SOC 是内圈配合产物,二者的稳定性明显不同,且形成的环境也有所不同<sup>[7]</sup>。土壤 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 的主要影响因素包括土壤的地带性(空间气候、生物条件等)和土壤的盐基饱和度,我国土壤类型较多,土壤内部有机碳表现形式差异较大,其中石灰性土壤、黑钙土等钙含量较高的土壤以 Ca—SOC 为主,南方常见的红壤和砖红壤等铁、铝含量高的土壤则以 Fe(Al)—SOC 为主,李世朋等<sup>[8]</sup>研究了土壤中 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 之间的差异;雷敏等<sup>[9]</sup>则研究了长期施肥对水稻土中 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 形态的影响,但都仅仅停留在对整个土壤化学键合有机碳的研究,而对土壤团聚体内部化学键合有机碳的研究相对较少<sup>[10-12]</sup>。本课题组已对五台山土壤水稳性团聚体的颗粒有机碳和矿物结合有机碳进行了深入的研究,但对 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 的研究还处于起步阶段。因此,本文依托五台山特殊的土壤分布,研究不同土壤水稳性团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 的含量及相关关系,为该地区土壤的合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

五台山地处山西省忻州市五台县境内,与浙江普陀山、安徽九华山、四川峨眉山共称“中国佛教四大名山”,由东台、西台、南台、北台、中台五座高峰组成,其中被称为“华北屋脊”的北台,海拔高度达 3 061.1 m。五台山气候凉爽,有“清凉山”之称,1 月最冷,7—8 月最热,年均降水量 1 000 mm,是山西省降水最多的地区。自然植被以草地为主,是优良的天然夏季牧场,五台山高寒草甸是华北地区最典型、类型最丰富、草质和生产力最高的山

地草甸<sup>[13]</sup>。此外,高海拔还造就了华北地区比较完整的土壤垂直带谱,土壤类型从高到低依次为亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤、淋溶褐土和石灰性褐土。

### 1.2 供试土壤样本的采集

在五台山的东台、南台和北坡不同海拔高度对亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤、淋溶褐土和石灰性褐土进行采集(各土壤的海拔高度、坡度及土壤基本理化性质见文献<sup>[14]</sup>),每种土壤设置约 10 m<sup>2</sup> 的采样单元,在选定区域对角线采集 3 个土壤团聚体样本,各单元采用“S”布点取样,8~10 点等量(深度均为 0~20 cm)采集后混合,以此作为 1 个土壤样本。

### 1.3 项目分析与方法

1.3.1 土壤团聚体的分离提取与制备 各土壤团聚体通过湿筛法进行分离提取<sup>[15]</sup>。制备得到 >2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 4 级土壤团聚体。

1.3.2 土壤和各级团聚体中 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 的分离提取 Ca—SOC 的分离提取采用 0.5 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液提取;Fe(Al)—SOC 的分离提取采用 0.1 mol/L NaOH 和 Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的混合溶液提取<sup>[16]</sup>。

1.3.3 有机碳含量的测定 土壤及各级团聚体有机碳、Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 均通过重铬酸钾容量法—外加热法测定。

1.3.4 土壤和各级团聚体中 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量及分配比例的计算

某粒级团聚体中 Ca—SOC 或 Fe(Al)—SOC 的含量=某粒级团聚体中 Ca—SOC 或 Fe(Al)—SOC 的浓度×该粒级团聚体组成

土壤 Ca—SOC 或 Fe(Al)—SOC 的分配比例=土壤 Ca—SOC 或 Fe(Al)—SOC 含量/土壤有机碳含量×100%

某粒级团聚体中 Ca—SOC 或 Fe(Al)—SOC 的分配比例=某粒级团聚体中 Ca—SOC 或 Fe(Al)—SOC 含量/土壤有机碳含量×100%

### 1.4 数据处理与分析

数据处理采用 WPS 2016,统计分析以及差异显著性检验采用 SPSS 21 统计分析软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稳性团聚体中 Ca—SOC 的分布

2.1.1 全土与各级团聚体 Ca—SOC 含量 从图 1 可以看出,全土,>2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 团聚体中 Ca—SOC 含量变化分别为 0.73~1.19, 0.03~0.55, 0.06~0.56, 0.07~0.32, 0.11~0.17 g/kg。全土的 Ca—SOC 含量随海拔高度的降低没有明显的变化趋

势,大小依次为 $B>C>E>D>A$ ,其中 A 与 D 以及 C 与 E 差异不显著,其他土壤之间差异显著。各土壤 $>2$  mm 团聚体的 Ca—SOC 含量大小为 $C>B>D>A>E$ ,其中 A 与 D 及 B 与 C 之间差异不显著,其他土壤 Ca—SOC 含量差异显著; $2\sim0.25$  mm 团聚体的 Ca—SOC 含量大小为 $D>C>A>B>E$ ,且彼此差异显著; $0.25\sim0.053$  mm 团聚体的 Ca—SOC 含量大小为 $D>A=C>E>B$ ,其中 A、B、C、E 之间差异不显著,而与 D 之间差异显著; $<0.053$  mm 团聚体 Ca—SOC 含量大小为 $D>E>A>B=C$ ,其中 A、B、C 之间差异不显著,D 与 E 之间差异也不显著。

2.1.2 全土与各级团聚体 Ca—SOC 分配比例 由表 1 可知,全土, $>2,2\sim0.25,0.25\sim0.053,<0.053$  mm 团聚体中 Ca—SOC 分配比例变化分别为 $1.00\%\sim7.86\%,0.28\%\sim1.20\%,0.54\%\sim1.80\%,0.10\%\sim1.04\%,0.15\%\sim1.29\%$ 。全土的 Ca—SOC 分配比例大小为 $E>D>B>C>A$ ,B 与 C 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著。各土壤 $>2$  mm 团聚体 Ca—SOC 分

配比例大小为 $D>C>B>A>E$ ,其中 A 与 E 及 B 与 C 差异不显著,而其他土壤之间差异显著; $2\sim0.25$  mm 团聚体 Ca—SOC 分配比例大小为 $D>C>A>E>B$ ,其中 A、B、C、E 之间差异不显著,但与 D 之间差异显著; $0.25\sim0.053$  mm 团聚体 Ca—SOC 分配比例大小为 $D>E>C>A>B$ ,其中 A、B、C 之间以及 D 与 E 之间差异均不显著; $<0.053$  mm 团聚体 Ca—SOC 分配比例大小为 $E>D>C>A>B$ ,其中 A、B、C 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著。

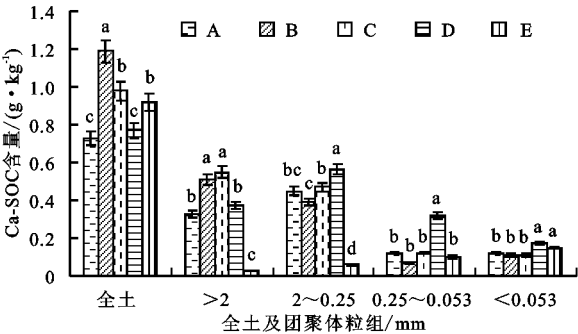


图 1 全土与各级团聚体 Ca—SOC 含量

表 1 全土与各级团聚体中 Ca—SOC 分配比例 单位: %

| 土样编号 | 全土             | $>2$ mm        | $2\sim0.25$ mm | $0.25\sim0.053$ mm | $<0.053$ mm    |
|------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|
| A    | $1.00\pm0.05d$ | $0.45\pm0.15c$ | $0.62\pm0.04b$ | $0.16\pm0.04b$     | $0.16\pm0.02c$ |
| B    | $1.65\pm0.03c$ | $0.71\pm0.04b$ | $0.54\pm0.02b$ | $0.10\pm0.01b$     | $0.15\pm0.03c$ |
| C    | $1.55\pm0.06c$ | $0.86\pm0.13b$ | $0.74\pm0.04b$ | $0.19\pm0.02b$     | $0.18\pm0.02c$ |
| D    | $2.49\pm0.04b$ | $1.20\pm0.08a$ | $1.80\pm0.27a$ | $1.04\pm0.13a$     | $0.54\pm0.01b$ |
| E    | $7.86\pm0.38a$ | $0.28\pm0.03c$ | $0.55\pm0.03b$ | $0.85\pm0.31a$     | $1.29\pm0.03a$ |
| 变异系数 | 96.84          | 51.70          | 63.03          | 94.33              | 105.96         |

注:数据均以平均值±标准差表示,同列小写字母分别表示不同土壤间的显著差异( $P<0.05$ )。下同。

2.2 水稳性团聚体中 Fe(Al)—SOC 的分布

2.2.1 全土与各级团聚体 Fe(Al)—SOC 含量 从图 2 可以看出,全土, $>2,2\sim0.25,0.25\sim0.053,<0.053$  mm 团聚体中 Fe(Al)—SOC 含量变化分别为 $1.60\sim29.39,0.20\sim18.45,0.33\sim13.77,0.62\sim8.33,0.92\sim4.8$  g/kg。全土的 Fe(Al)—SOC 含量随海拔高度的降低呈先增加后降低的变化趋势,大小依次为 $C>B>A>D>E$ ,其中 A 与 B 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著。各土壤 $>2$  mm 团聚体的 Fe(Al)—SOC 含量大小为 $A>C>B>D>E$ ,彼此之间差异均显著; $2\sim0.25$  mm 团聚体的 Fe(Al)—SOC 含量大小为 $C>A>B>D>E$ ,A、B、C 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著; $0.25\sim0.053$  mm 团聚体的 Fe(Al)—SOC 含量大小为 $D>C>A>B>E$ ,各土壤之间差异均显著; $<0.053$  mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 含量大小为 $A>C>D>B>E$ ,各土壤之间差异均显著。

2.2.2 全土与各级团聚体 Fe(Al)—SOC 分配比例 由表 2 可知,全土, $>2,2\sim0.25,0.25\sim0.053,<0.053$  mm 团聚体中 Fe(Al)—SOC 分配比例变化分别为 $13.58\%\sim$

$46.44\%,1.72\%\sim25.69\%,2.79\%\sim34.46\%,2.75\%\sim26.76\%,3.98\%\sim11.15\%$ 。

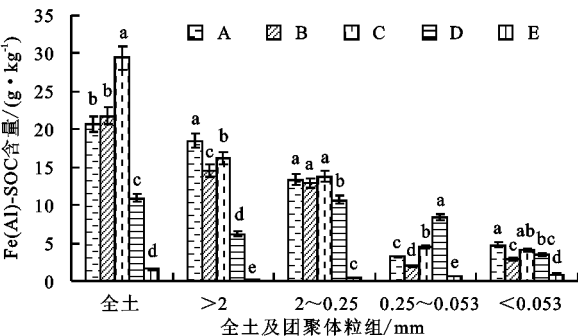


图 2 全土与各级团聚体 Fe(Al)—SOC 含量

全土的 Fe(Al)—SOC 分配比例大小为 $C>D>B>A>E$ ,且各土壤之间差异显著。各土壤 $>2$  mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 分配比例大小为 $C>A>B>D>E$ ,其中 A 与 C 及 B 与 D 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著; $2\sim0.25$  mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 分配比例大小为 $D>C>A>B>E$ ,其中 A 与 B 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著; $0.25\sim0.053$  mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 分配比例大小为 $D>C>E>A>B$ ,各土壤之间差异均显著; $<0.053$  mm 团聚体 Fe

(Al)—SOC 分配比例大小: D>E>A>C>B, 其中 A、C、E 之间差异不显著, 其他土壤之间差异显著。

表 2 全土与各级团聚体中 Fe(Al)—SOC 分配比例 单位: %

| 土样编号 | 全土          | >2 mm       | 2~0.25 mm   | 0.25~0.053 mm | <0.053 mm   |
|------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| A    | 28.50±1.03d | 25.48±1.68a | 18.45±1.86c | 4.39±0.75cd   | 6.62±0.31b  |
| B    | 30.29±0.77c | 20.25±0.96b | 18.04±1.31c | 2.75±0.52d    | 3.98±0.85c  |
| C    | 46.44±1.11a | 25.69±1.79a | 21.76±0.95b | 7.05±0.13b    | 6.48±0.93b  |
| D    | 35.18±1.28b | 19.80±1.28b | 34.46±1.69a | 26.76±1.89a   | 11.15±1.09a |
| E    | 13.58±0.04e | 1.72±0.48c  | 2.79±0.24d  | 5.23±0.63c    | 7.79±1.11b  |
| 变异系数 | 38.61       | 52.89       | 59.14       | 107.35        | 36.15       |

2.3 水稳性团聚体有机碳与土壤有机碳之间的关系

2.3.1 水稳性团聚体中 Ca—SOC 与土壤有机碳之间的关系 图 3 的相关性分析表明, 各级水稳性团聚体 Ca—SOC 与土壤有机碳之间没有明显的相关性。

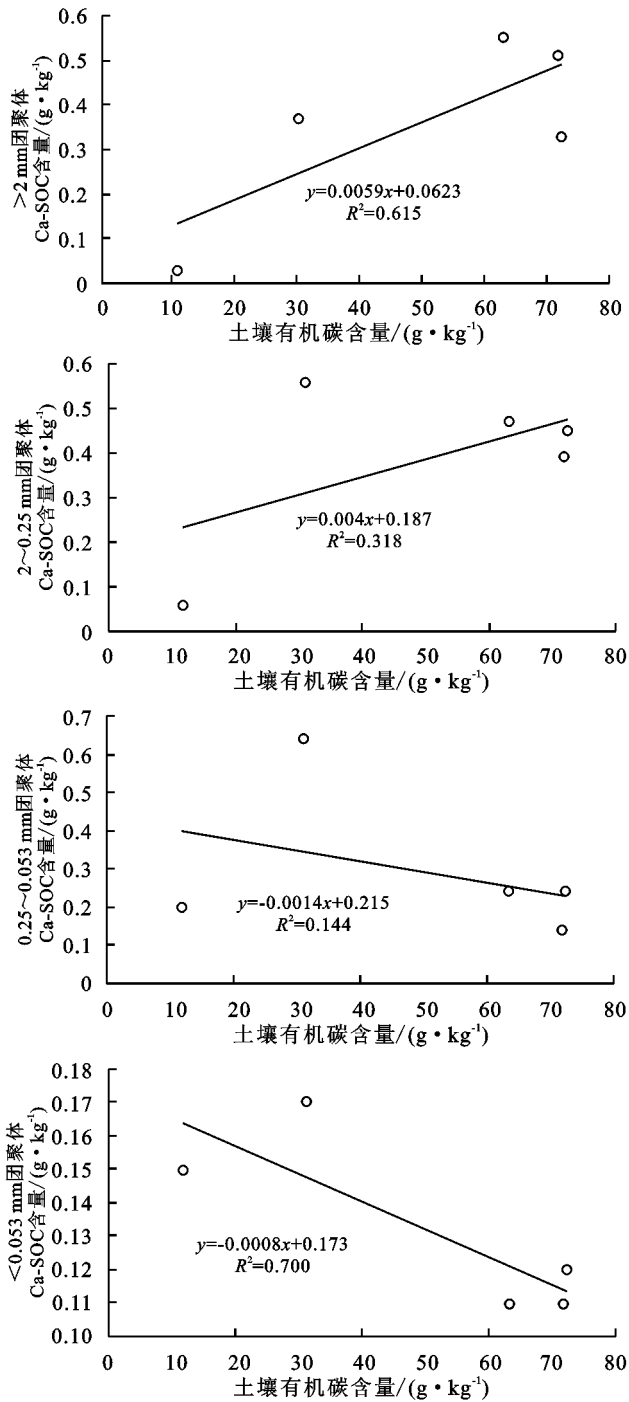


图 3 各级团聚体 Ca—SOC 含量与土壤有机碳含量之间的关系

2.3.2 水稳性团聚体中 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳之间的关系 图 4 的相关性分析表明, 各土壤水稳性团聚体 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳含量之间呈显著正相关, 相关系数为  $r=0.898(P<0.05)$ ; >2 mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳含量之间呈极显著正相关, 相关系数为  $r=0.978(P<0.01)$ ; 2~0.25 mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳含量之间呈显著正相关, 相关系数为  $r=0.885(P<0.05)$ ; 但 0.25~0.053 mm 以及 <0.053 mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳含量之间没有明显相关性。

2.4 水稳性团聚体中 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 之间的关系

从图 5 的相关性分析可以看出, 2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量之间呈显著正相关, 相关系数分别为  $r=0.878$  和  $r=0.915(P<0.05)$ , 各土壤以及其他粒级的团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量之间没有明显相关性。

3 讨论

3.1 各土壤 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量及分布差异

五台山垂直带土壤 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 的含量及分布特征之所以不同, 是因为不同的土壤拥有不同的土壤垂直地带性, 包括土壤的成土气候、生物条件以及盐基饱和度等因素。五台山地处黄土高原东部, 是位于暖温带半干旱森林草原型生物气候特征带的北缘, 它的地基带土壤为褐土中的石灰性褐土, 但是由于地形地貌等成土因素的差异而形成不同类型的土壤。气候方面从高到低依次表现为: 冷湿(亚高山草甸土、山地草甸土)—凉润(棕壤)—湿润(淋溶褐土)—暖旱(石灰性褐土), 生物条件方面的差异主要表现在各土壤所生长的植物的不同, 从高到低依次为亚高山草甸(亚高山草甸土)、山地五花草甸(山地草甸土)、常绿针叶林(棕壤)、夏绿阔叶林(淋溶褐土)、旱生草本与农垦作物(石灰性褐土)。盐基饱和度是指土壤胶体上所吸附的交换性盐基离子占交换性阳离子总量的百分数, 它的大小可以直观反映不同土壤 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量的不同, 而

且受到土壤酸碱性的影响,五台山垂直带土壤的酸碱性变化较大,导致其盐基饱和度的差异,从而影响化学键合有机碳的分布特征。

SOC 的含量逐渐降低,土壤有机碳物理化学保护作用逐渐增强<sup>[12]</sup>,这是由于过剩的有机碳大量积累,导致有机碳未能全部形成结合态有机碳,而对 Ca—SOC 造成稀释效应所致<sup>[11]</sup>。

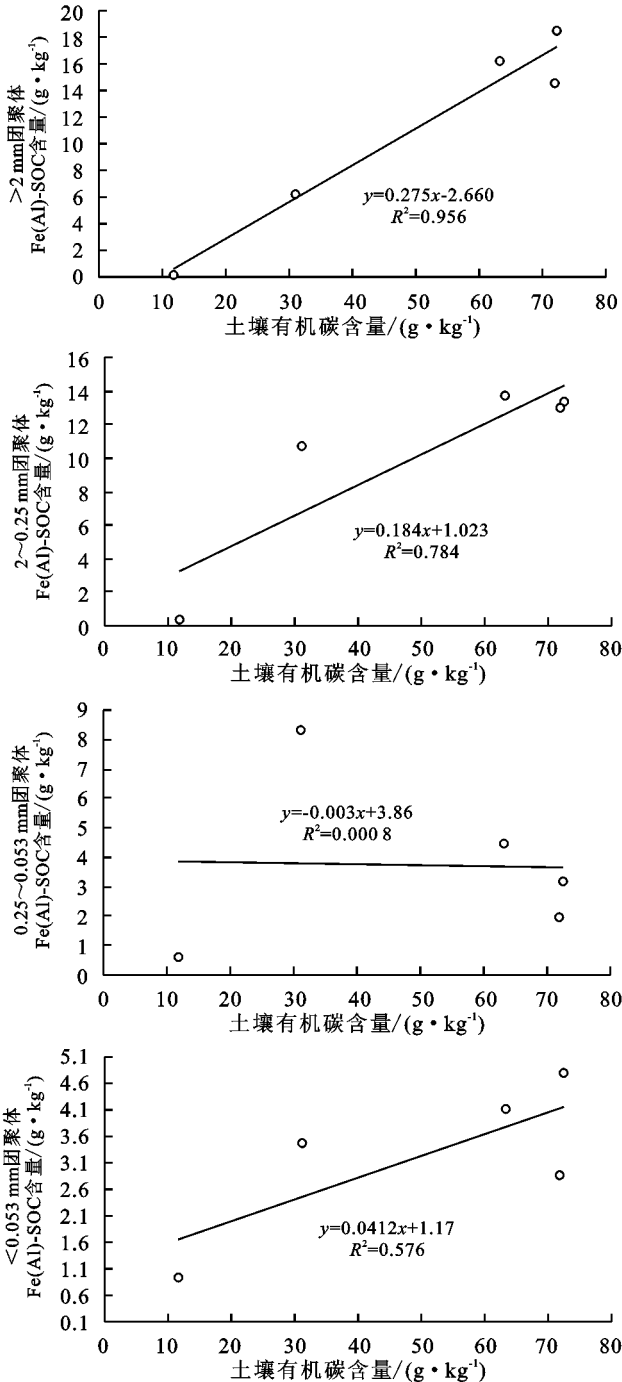


图 4 各级团聚体 Fe(Al)—SOC 含量与土壤有机碳含量之间的关系

### 3.2 各土壤及各级水稳性团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量

Mikutta 等<sup>[17]</sup>认为,土壤团聚体中存在有机碳的物理保护和化学保护双重作用,团聚体物理保护下的有机碳通过钙和铁铝等金属键桥相结合成为稳定的有机—矿质复合体。有研究显示,伴随着有机肥的施入,土壤中的 Fe(Al)—SOC 含量逐渐升高,而 Ca—

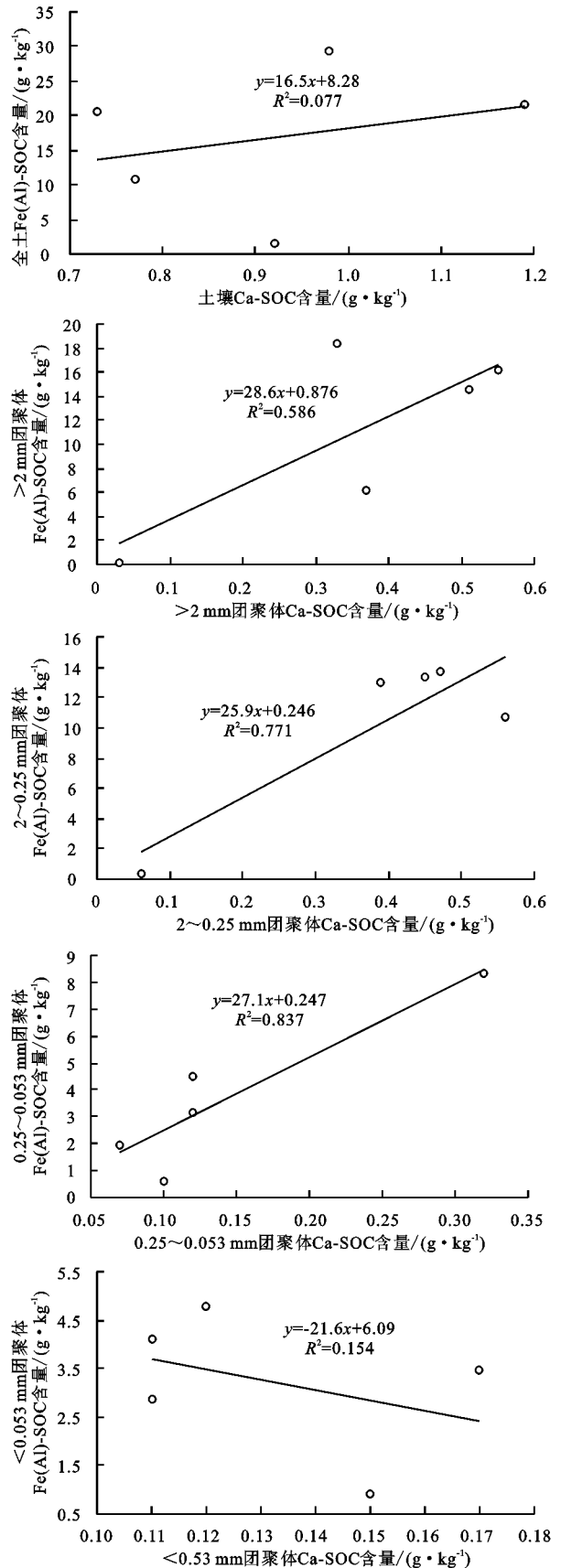


图 5 各级团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量之间的关系

相关性分析表明,土壤和各级团聚体 Ca—SOC 与土壤有机碳之间没有明显的相关性,这与徐文静<sup>[18]</sup>的结果一致,各土壤及大团聚体 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳含量之间呈显著正相关关系,表明随着土壤有机碳含量的增加,土壤 Fe(Al)—SOC 的含量也在增加,在克服稀释效应的同时,说明铁铝键的键合能力以及 Fe(Al)—SOC 复合体的稳定性高于 Ca—SOC。此外,<0.053 mm 团聚体 Ca—SOC 分配比例和 0.25~0.053 mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 分配比例的变异系数最大,表明随着海拔高度的变化,<0.053 mm 团聚体 Ca—SOC 分配比例和 0.25~0.053 mm 团聚体 Fe(Al)—SOC 分配比例变化最大。随着土壤团聚体粒径的减小,棕壤的 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量逐渐下降,而石灰性褐土的 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量呈现逐渐升高,表明棕壤的 2 种键合有机碳主要存在于大团聚体中,而石灰性褐土的键合有机碳主要存在于微团聚体中。

## 4 结论

(1)土壤和各级大团聚体 Fe(Al)—SOC 与土壤有机碳含量之间呈显著正相关关系,相关系数分别为  $r_{\text{土壤}}=0.898(P<0.05)$ 、 $r_{>2\text{ mm}}=0.978(P<0.01)$ 、 $r_{2\sim0.25\text{ mm}}=0.885(P<0.05)$ ,各土壤铁铝键的键合能力以及 Fe(Al)—SOC 复合体的稳定性均高于 Ca—SOC。

(2)土壤和各级团聚体的 Fe(Al)—SOC 含量及分配比例明显高于 Ca—SOC,2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体 Ca—SOC 和 Fe(Al)—SOC 含量之间都呈显著正相关,相关系数分别为  $r_{2\sim0.25\text{ mm}}=0.878$  和  $r_{0.25\sim0.053\text{ mm}}=0.915(P<0.05)$ 。

### 参考文献:

- [1] Lal R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century[J]. Soil Science, 2000, 165(3):191-207.
- [2] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1):7-31.
- [3] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J].

Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(6): 1078-1085.

- [4] 王丽,李军,李娟,等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3):759-768.
- [5] 周萍,宋国菡,潘根兴,等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I. 团聚体物理保护作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(6):1063-1071.
- [6] Osher L J, Matson P A, Amundson R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii[J]. Biogeochemistry, 2003, 65(2):213-232.
- [7] 徐建民,赛夫,袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 IX. 钙键复合体和铁铝键复合体中腐殖质的性状特征[J]. 土壤学报, 1999, 36(2):168-178.
- [8] 李世朋,汪景宽,王开勇,等. 土壤中钙键和铁/铝键结合的有机碳差异的比较[J]. 土壤通报, 2003, 34(6):501-504.
- [9] 雷敏,周萍,黄道友,等. 长期施肥对水稻土有机碳分布及化学结合形态的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 967-974.
- [10] 邵继承,靳振江,崔立强,等. 不同土地利用下湖北江汉平原湿地起源土壤有机碳组分的变化[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):124-128.
- [11] 杨恒山,邵继承,范富. 播种方式对人工草地土壤有机碳氧化稳定性和化学结合形态的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3):36-42.
- [12] 周萍,宋国菡,潘根兴,等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报, 2009, 46(2):263-273.
- [13] 段青倩,樊文华,吴艳军,等. 旅游踩踏对五台山北台山地草甸土酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 46(4):97-100.
- [14] 李雄飞,刘奋武,樊文华. 五台山土壤水稳性团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4):159-165.
- [15] 牛莉芹,程占红,张峰. 五台山草甸多样性分析[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4):573-577.
- [16] 徐建民,侯惠珍. 土壤有机矿质复合体研究:Ⅷ. 分离钙键有机矿质复合体的浸提剂:硫酸钠[J]. 土壤学报, 1998, 35(4):468-474.
- [17] Mikutta R, Kleber M, Torn M S, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? [J]. Biogeochemistry, 2006, 77(1):25-56.
- [18] 徐文静. 黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳分布及其存在形态的研究[D]. 黑龙江 绥化:沈阳农业大学, 2016.