

五台山土壤水稳性团聚体有机碳分布特征

李雄飞^{1,2}, 刘奋武^{1,2}, 樊文华^{1,2}

(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: 为揭示五台山垂直带土壤不同形态团聚体有机碳的分布特征, 以五台山垂直带土壤为研究对象, 于2016年8月从高海拔至低海拔对亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤、淋溶褐土、石灰性褐土样品进行采集, 并且通过湿筛法和物理分组技术获得不同土壤类型中 >2 , $2\sim0.25$, $0.25\sim0.053$, <0.053 mm水稳性团聚体, 进一步分析了土壤及各级水稳性团聚体的总有机碳、颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MOC)。结果表明: 亚高山草甸土、山地草甸土和棕壤均以 >2 mm团聚体为最多, 达到总水稳性团聚体的45.13%。然而, 淋溶褐土和石灰性褐土中分别以 $2\sim0.25$ mm和 $0.25\sim0.053$ mm团聚体为最多, 分别达到33.79%和39.95%。随着海拔高度的降低土壤有机碳含量依次降低, 且不同土壤类型中, >2 mm和 $2\sim0.25$ mm团聚体有机碳含量与其对应的土壤有机碳含量呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 $r_{>2\text{ mm}}=0.986$ 和 $r_{2\sim0.25\text{ mm}}=0.966$ ($P<0.01$)。随着土壤团聚体粒径的减小, 亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤的POC含量呈现下降趋势, 而淋溶褐土和石灰性褐土的POC含量呈现升高趋势。亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤的MOC含量都以 >2 mm团聚体为最大, 淋溶褐土和石灰性褐土分别以 $2\sim0.25$ mm和 $0.25\sim0.053$ mm团聚体的MOC含量为最大。各土壤及团聚体中MOC的含量要明显大于POC的含量, 而且在土壤和各级大团聚体中二者呈现正相关关系 ($P<0.05$)。此外, 各土壤POC和MOC的含量与土壤有机碳含量也呈现正相关关系 ($P<0.05$)。因此, 随着海拔高度的降低, 各土壤团聚体组成由大团聚体向微团聚体转变, 亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤的碳截获能力强于淋溶褐土和石灰性褐土。

关键词: 五台山; 水稳性团聚体; 颗粒有机碳; 矿物结合有机碳

中图分类号: S152.4; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0159-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.026

Distribution Characteristics of Organic Carbon in Soil Water-stable Aggregates of Wutai Mountain

LI Xiongfei^{1,2}, LIU Fenwu^{1,2}, FAN Wenhua^{1,2}

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

Abstract: To explore organic carbon distribution characteristics in different soil aggregates of Wutai Mountain vertical zone, the soil samples which including subalpine meadow soil, mountain meadow soil, brown soil, leached cinnamon soil and calcareous cinnamon soil were collected from high altitude to low altitude in August 2016. Water-stable aggregates in different levels (>2 mm, $2\sim0.25$ mm, $0.25\sim0.053$ mm and <0.053 mm) of different type soils were harvested through wet-sieving method and physical fractionation technique, and the TOC, POC and MOC of all level aggregates and soils were further analyzed. The results showed that subalpine meadow soil, mountain meadow soil and brown soil all mainly composed by >2 mm aggregates, which accounted for 45.13% of all water-stable aggregates. However, cinnamon soil and calcareous cinnamon soil were mainly composed by $2\sim0.25$ mm and $0.25\sim0.053$ mm aggregates respectively, reached 33.79% and 39.95%. With the decrease of altitude, soil organic carbon content decreased. Besides, the organic carbon content of >2 mm and $2\sim0.25$ mm aggregates in different type soils had a great significant positive correlation with the corresponding soil organic carbon content and the correlation coefficients were $r_{>2\text{ mm}}=0.986$, $r_{2\sim0.25\text{ mm}}=0.966$ ($P<0.01$). Although with the decrease of soil aggregates diameter, the POC contents of subalpine meadow soil, mountain meadow soil and brown soil

收稿日期: 2017-04-17

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

decreased, and the POC contents of leached cinnamon soil and calcareous cinnamon soil increased. The MOC content of subalpine meadow soil, mountain meadow soil and brown soil were highest in >2 mm aggregates, and the MOC content of leached cinnamon soil, calcareous cinnamon soil were highest in $2\sim0.25$ mm and $0.25\sim0.053$ mm aggregates, respectively. The soil MOC content was significantly greater than the POC content, and these two showed a positive correlation in soils and all level macro-aggregates ($P<0.05$). In addition, the content of POC and MOC in soils also showed a positive correlation with the content of soil organic carbon ($P<0.05$). Therefore, the soil aggregates turned from macro-aggregates to micro-aggregates with the decrease of altitude, and the carbon capture ability of subalpine meadow soil, mountain meadow soil and brown soil was stronger than leached cinnamon soil and calcareous cinnamon soil.

Keywords: Wutai Mountain; water-stable aggregates; POC; MOC

土壤是陆地最大的有机碳库,含碳量大约 2 400 Pg(深 2 m),是目前大气中二氧化碳含碳量的 3 倍和年平均化石燃料排放量的 240 倍^[1],土壤有机碳的固存对全球气候的改善至关重要。土壤团聚体是土粒通过各种自然过程的作用而形成的直径 <10 mm 的基本结构单元,对土壤的基本理化性质有较大的影响,而且土壤团聚体对有机碳具有物理保护作用,不同粒径的团聚体对改善土壤结构、维持土壤养分的作用不同。此外,土壤各粒径团聚体中的有机碳含量是土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征,在土壤肥力和土壤碳汇中具有双重意义^[2]。土壤颗粒态有机碳(POC)是由大颗粒有机物组成,可通过筛分的方法从土壤中分离出来,它是新鲜植物残体和稳定腐殖质之间的过渡碳库,主要作用是保护游离的 POC 轻质组分或被土壤颗粒包裹的有机质使其免受降解。土壤中的细颗粒,特别是黏粉粒,具有较大的比表面积,能通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附土壤有机质分解过程中的产物,从而形成矿物结合态有机碳(MOC, <0.053 mm)^[3],它的周转期较慢且稳定,一般认为是非活性有机碳,同时受土壤黏粒和粉粒的保护,其含量多少可以间接表示土壤有机碳的稳定程度与难利用程度^[4]。目前,我国关于土壤水稳性团聚体有机碳的研究主要集中在水稻土、黑土以及其它耕作土壤^[5-9],在山地垂直带土壤有机碳的研究中,大多是对土壤总有机碳和 POC 分布的研究^[10-13],而对不同粒径团聚体中 POC 和 MOC 分布特征的研究较少。但是,与矿物黏粒结合的微团聚体又是有机质(或碳)固定的长期和稳定场所^[14],因此,探究不同土壤团聚体中 POC 和 MOC 的含量及其相关关系对充分认识土壤有机碳的固定机理有重要的科学意义。鉴于此,本文以五台山垂直带谱土壤为研究对象,研究不同土壤水稳性团聚体有机碳及其 POC 和 MOC 的含量以及相互关系,以期明确五台山地区土壤有机碳的固存特征及机制,为该地区土壤的合理利用以及土壤固碳容量和固碳增汇措施的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

五台山位于山西省的东北部(北纬 $38^{\circ}50'$ — $39^{\circ}05'$,东经 $113^{\circ}29'$ — $113^{\circ}44'$),属太行山系的北端,总面积 592.88 m^2 ,是中国四大佛教名山之一。最高峰北台,海拔高度 $3\,061.1$ m,有华北屋脊之称。自然植被垂直结构较明显,以山地草甸为主,是优良的自然夏季牧场,植被覆盖较好,而且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^[15]。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

于 2016 年 8 月进行土壤样品的采集,分别在东台、南台和五台台北坡不同海拔高度的 5 个地区选取具有代表性的亚高山草甸土(A,海拔 $2\,762\sim2\,768$ m,坡度 25°)、山地草甸土(B,海拔 $2\,443\sim2\,452$ m,坡度 5°)、棕壤(C,海拔 $2\,291\sim2\,297$ m,坡度 20°)、淋溶褐土(D,海拔 $1\,846\sim1\,853$ m,坡度 15°)和石灰性褐土(E,海拔 $1\,115$ m,坡度 2°),每种土壤设置 1 个大小约为 10 m^2 的采样单元,在选定区域内延对角线采集 3 个土壤样本(深度均为 $0\sim20$ cm),每个土壤样本都用铁饭盒收集保存,避免土壤团聚体的破坏,同时,各单元采用“S”形布点取样,8~10 点等量(深度均为 $0\sim20$ cm)采集后混合,以此作为一个土壤样本,用来测定土壤的基本理化性质,各土壤基本理化性质见表 1。

1.3 测定指标与方法

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^[16]。

制备得到 >2 、 $2\sim0.25$ 、 $0.25\sim0.053$ 、 <0.053 mm 四级土壤团聚体,并且计算各级水稳性团聚体组成。

平均重量直径计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n d_i \times m_i$$

式中:MWD 是团聚体的平均重量直径(mm); i 为第

i 级团聚体; n 为团聚体总级数; $\bar{d}$ 为第 i 级团聚体颗粒组的平均直径(mm); M 为各级团聚体组成(%)。

表 1 供试土壤基本理化性质

土样 编号	有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	pH	机械组成/%		
					<0.002 mm	0.02~0.002 mm	>0.02 mm
A	72.40	1.90	38.11	5.64	13.36	54.28	32.36
B	71.79	1.89	37.98	5.82	14.88	49.52	35.60
C	63.29	1.76	35.96	6.01	16.54	51.23	32.23
D	31.10	1.03	30.19	7.75	14.39	50.20	35.41
E	11.78	0.98	12.02	8.14	12.05	37.92	50.03

1.3.2 土壤及各级团聚体中 POC 和 MOC 的分离提取 土壤及各级团聚体 POC 和 MOC 通过 5 g/L 六偏磷酸钠溶液进行分离提取^[17]。

1.3.3 有机碳含量的测定 土壤及各级团聚体有机碳、POC、MOC 采用重铬酸钾容量法—外加热法测定。

1.3.4 计算方法

(1)土壤中 POC 和 MOC 含量(g/kg)及其分配比例(%)计算方法:

土壤 POC 含量=>0.053 mm 颗粒物中有机碳×该颗粒物占干土重的百分比

土壤 MOC 含量=<0.053 mm 颗粒物中有机碳×该颗粒物占干土重的百分比

土壤 POC 分配比例=土壤 POC 含量/土壤有机碳含量×100

土壤 MOC 分配比例=土壤 MOC 含量/土壤有机碳含量×100

(2)各级团聚体中有机碳、POC 和 MOC 含量(g/kg)及其分配比例(%)的计算方法:

某粒级团聚体中有机碳含量=某粒级团聚体中有机碳浓度(团聚体)×该粒级团聚体组成

某粒级团聚体中 POC 含量=某粒级团聚体中>0.053 mm 颗粒物中有机碳×该颗粒物占水稳性团聚体的百分比×该粒级团聚体组成

某粒级团聚体中 MOC 含量=某粒级团聚体中<0.053 mm 颗粒物中有机碳×该颗粒物占水稳性团聚体的百分比×该粒级团聚体组成

某粒级团聚体中有机碳的分配比例=某粒级团

聚体有机碳含量/土壤有机碳含量×100

某粒级团聚体中 POC 的分配比例=某粒级团聚体中 POC 含量/土壤有机碳含量×100

某粒级团聚体中 MOC 的分配比例=某粒级团聚体中 MOC 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 Excel 2010,统计分析以及差异显著性检验采用 SPSS 22 专业统计软件。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体组成

由表 2 可知,A、B、C、D 4 种土壤都以大团聚体为主,E 土壤以微团聚体为主。随着团聚体粒径的减小,A、B、C 3 种土壤的团聚体组成呈现“V”形分布,且都以>2 mm 团聚体组成为最大,0.25~0.053 mm 团聚体组成为最小,而 D、E 土壤的团聚体组成呈现倒“V”形分布,其中 D 土壤以 2~0.25 mm 团聚体组成为最大,E 土壤以 0.25~0.053 mm 团聚体组成为最大。由差异性分析可知,B 土壤的各级大团聚体组成均高于其他土壤,而各级微团聚体均小于其他土壤,且都达到显著性差异水平;此外,A 与 C 的各级团聚体组成差异均不显著。各土壤 0.25~0.053 mm 团聚体组成的变异系数最大,表明随着土壤有机碳的变化,0.25~0.053 mm 团聚体的组成变化最大。平均重量直径的大小代表土壤团聚体的稳定性,各土壤团聚体平均重量直径大小为 B>A>C>D>E,表明 B 土壤的团聚体稳定性最强,E 土壤的团聚体稳定性最弱。

表 2 土壤各级团聚体组成及其平均重量直径

土样编号	大团聚体/%			微团聚体/%		均重量 直径/mm
	>2 mm	2~0.25 mm	>0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	
A	44.54±0.15b	33.48±0.58b	78.01±0.59b	9.20±0.18c	12.79±0.66c	1.95±0.01b
B	46.71±0.58a	37.32±0.47a	84.03±1.05a	6.22±0.45d	9.75±0.48d	2.07±0.08a
C	44.13±0.74b	34.04±0.43b	78.17±0.46b	10.31±0.12c	11.52±0.41c	1.94±0.08b
D	27.59±0.46c	33.79±0.78b	61.38±0.46c	23.92±0.42b	14.70±0.04b	1.39±0.03c
E	9.82±0.51d	13.12±0.29c	23.79±1.28d	39.95±0.82a	37.11±0.91a	0.56±0.06d
变异系数/%	45.74	32.14	35.64	78.54	65.74	39.77

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差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 土壤有机碳含量与团聚体组成之间的相关关系

由图 1 可知,>2 mm 团聚体组成与土壤有机碳含量之间呈极显著正相关关系($r=0.982,P<0.01$),0.25~0.053 mm 团聚体组成与有机碳含量之间呈

极显著负相关关系($r=-0.982,P<0.01$),土壤有机碳含量与 2~0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体组成没有明显相关性。随着土壤有机碳含量的增加,大团聚体颗粒组成在增加,而微团聚体颗粒组成在减小,

而且大团聚体内的有机碳含量大于微团聚体内的有

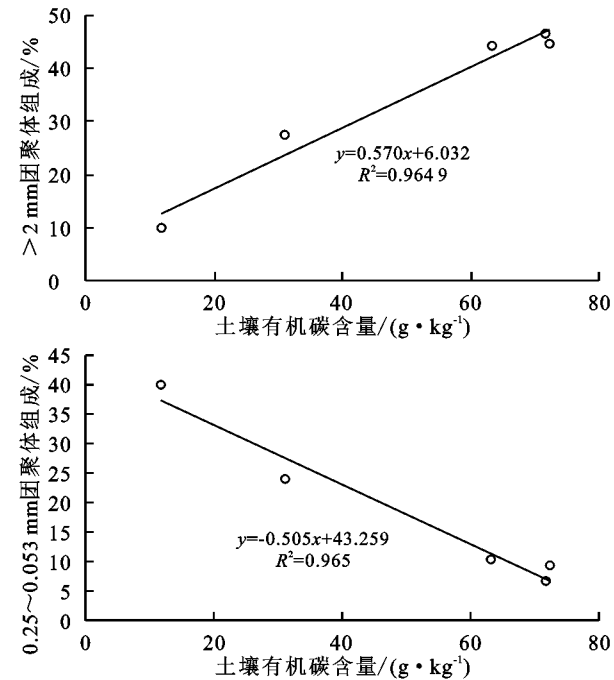
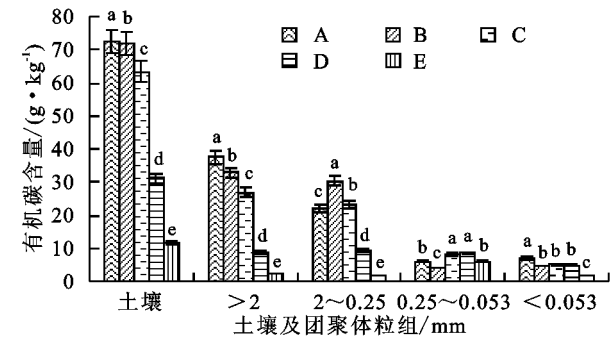


图 1 土壤有机碳含量与团聚体组成之间的关系

2.3 水稳性团聚体有机碳含量及分配比例

由图 2 可知,土壤及 $>2, 2\sim0.25, 0.25\sim0.053, <0.053$ mm 团聚体有机碳含量变化范围分别为 11.78~72.4, 2.26~37.50, 1.69~30.23, 4.11~8.50, 1.88~6.95 g/kg。各土壤有机碳含量随海拔高度的降低而减少,且相互之间差异显著。各土壤 >2 mm 团聚体有机碳含量的变化趋势与各土壤有机碳含量的变化趋势相同,也随海拔高度的降低而减少,同样差异显著。各土壤 $2\sim0.25$ mm 团聚体有机碳含量随着海拔高度的降低呈现先增加后减少的趋势,其中 B 土壤的 $2\sim0.25$ mm 团聚体有机碳含量最大,且彼此差异显著。各土壤 $0.25\sim0.053$ mm 团聚体有机碳含量大小为 $D>C>E>A>B$,其中 A 与 E、C 与 D 差异不显著,且与 B 均达显著性差异水平。各土壤 <0.053 mm 团聚体有机碳含量大小为 $A>C>D>B>E$,其中 B、C、D 之间差异不显著,但与其他土壤差异显著。

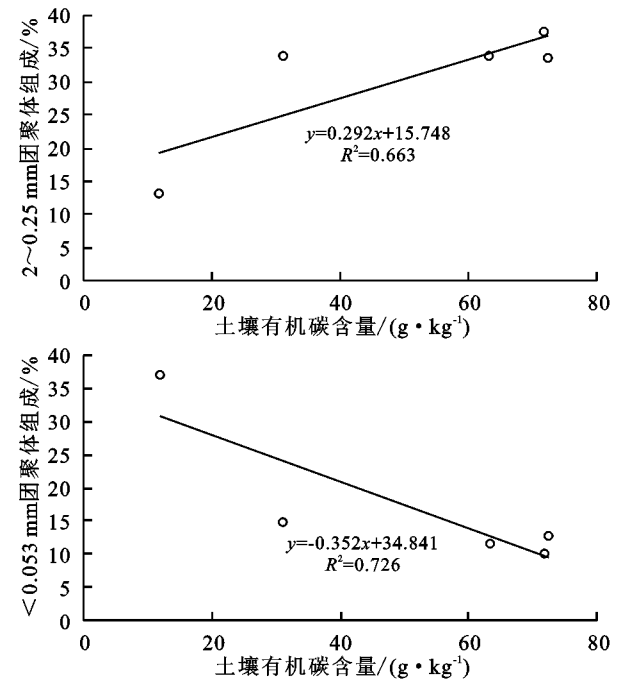


注:图中小写字母 a、b、c、d、e 表示不同土壤间的显著差异($P<0.05$)。下同。

图 2 土壤及各级团聚体有机碳含量

由表 3 可知,各土壤 $>2, 2\sim0.25, 0.25\sim0.053$

有机碳含量。



mm 团聚体有机碳分配比例大小分别为 $A>B>C>D>E, B>C>A>D>E$ 和 $E>D>C>A>B$,且各土壤之间差异均显著。各土壤 <0.053 mm 团聚体有机碳分配比例大小为 $E>D>A>C>B$,其中 A 与 C、D 与 E 之间差异不显著,但与 B 差异显著。此外, A、B、C 土壤的有机碳主要富集在 >2 mm 团聚体中,而 D 和 E 土壤的有机碳分别主要集中在 $2\sim0.25$ mm 和 $0.25\sim0.053$ mm 团聚体中; $0.25\sim0.053$ mm 团聚体有机碳分配比例的变异系数最大,表明随着海拔高度的变化, $0.25\sim0.053$ mm 团聚体有机碳的含量变化最大。

表 3 各团聚体中有机碳的分配比例

单位: %

土样编号	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
A	51.79±0.3a	30.45±0.81c	8.17±0.3d	9.60±0.46b
B	45.75±0.37b	42.10±0.54a	5.73±0.42e	6.42±0.32c
C	42.05±1.02c	36.97±0.91b	12.87±0.32c	8.10±1.24b
D	27.75±0.78d	29.56±0.92d	27.34±0.27b	15.34±0.27a
E	19.18±1.39e	14.32±0.74e	50.58±0.96a	15.93±0.18a
变异系数	36.05	34.14	88.68	38.95

2.4 水稳性团聚体中有机碳与土壤有机碳的关系

由图 3 可知, >2 mm 和 $2\sim0.25$ mm 团聚体有机碳含量与其对应的土壤有机碳含量呈极显著正相关关系,相关系数分别为 $r_{>2\text{ mm}}=0.986(P<0.01)$ 和 $r_{2\sim0.25\text{ mm}}=0.966(P<0.01)$ 。 $0.25\sim0.053$ mm 和 <0.053 mm 团聚体有机碳含量与其对应的土壤有机碳含量没有明显相关性。各土壤 >0.25 mm 的团聚体具有明显的固碳能力,而且 >2 mm 团聚体的固碳能力高于 $2\sim0.25$ mm 团聚体的固碳能力。

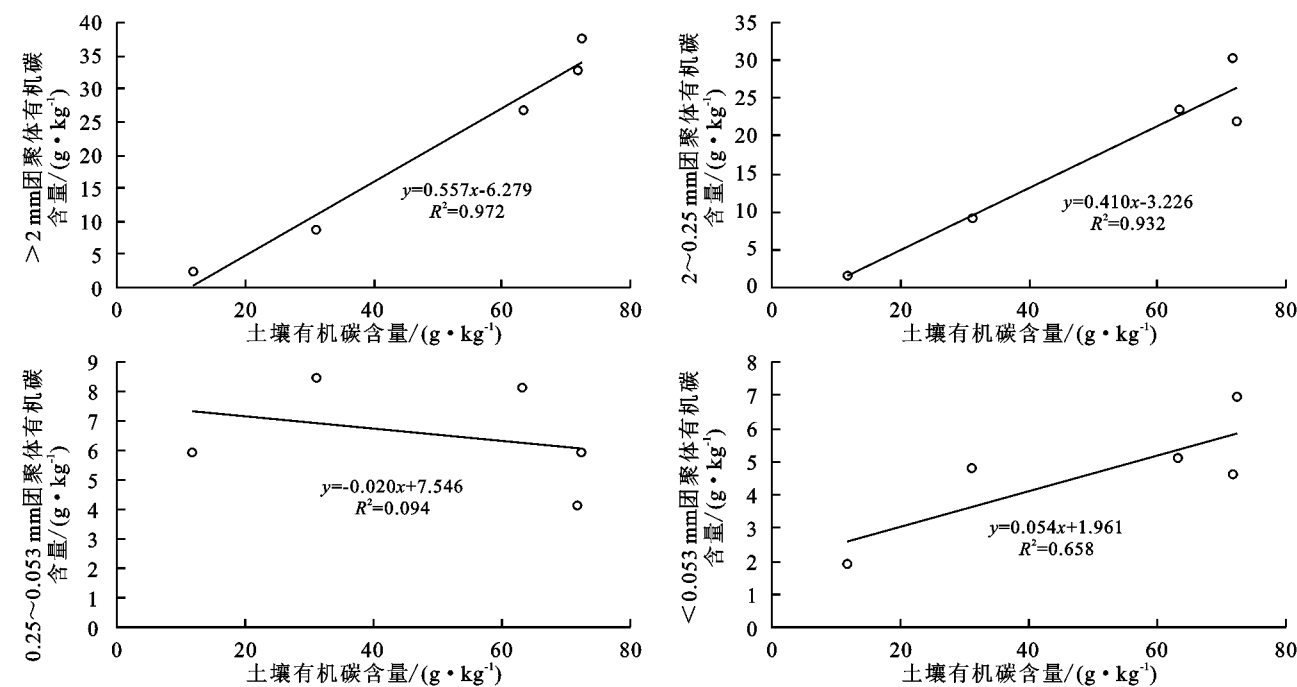


图 3 各级团聚体有机碳含量与土壤有机碳含量之间的关系

2.5 水稳性团聚体中 POC 的分布

2.5.1 水稳性团聚体中 POC 的含量 由图 4 可知,土壤及>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 团聚体中 POC 含量变化范围分别为 2.60~20.36 g/kg,0.47~10.05 g/kg,1.22~9.63 g/kg,1.03~3.31 g/kg。各土壤的 POC 含量随海拔高度的降低呈现先增加后减小的趋势,且 A、B、C 土壤的 POC 含量明显高于其他土壤,各土壤的 POC 含量差异均显著;>2 mm 团聚体的 POC 含量大小为 A>C>B>D>E,其中 A 与 C 差异不显著,其他土壤 POC 含量差异显著;2~0.25 mm 团聚体的 POC 含量大小为 C>B>A>D>E,其中 B 与 C 差异不显著,其他土壤 2~0.25 mm 团聚体的 POC 含量差异显著;0.25~0.053 mm 团聚体的 POC 含量大小为 D>C>E>A>B,各土壤之间差异均显著。此外,随着土壤团聚体粒径的减小,A、B、C 土壤的 POC 含量呈现下降趋势,而 D 和 E 土壤的 POC 含量呈现升高趋势。

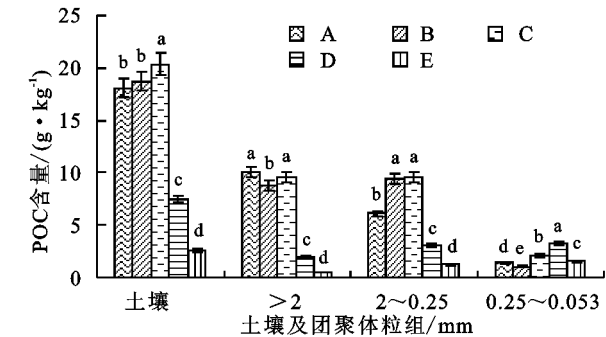


图 4 土壤及各级团聚体中颗粒有机碳含量

2.5.2 水稳性团聚体中 POC 的分配比例 由表 4 可知,土壤及>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 团聚体中

POC 分配比例变化范围分别为 22.07%~32.17%, 3.97%~15.25%,8.43%~15.21%,1.43%~13.11%。各土壤 POC 分配比例大小为 C>B>A>D>E,差异均达显著水平。各土壤>2 mm 团聚体 POC 分配比例大小为 C>A>B>D>E,其中 A 与 C 土壤差异不显著,而其他土壤差异显著。各土壤 2~0.25 mm 团聚体 POC 分配比例大小为 C>B>E>D>A,其中 A、D、E 之间差异不显著,其他土壤之间差异显著。各土壤 0.25~0.053 mm 团聚体 POC 分配比例大小为 E>D>C>A>B,其中 A、B、C 之间差异不显著,而与其他土壤差异显著。

表 4 土壤及各级团聚体中颗粒有机碳分配比例

土样编号	单位: %			
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
A	24.93±0.48c	13.89±0.90a	8.43±0.55c	1.93±0.15c
B	26.11±0.87b	12.21±1.10b	12.99±1.12b	1.43±0.08c
C	32.17±0.80a	15.25±0.72a	15.21±0.51a	3.36±0.44c
D	23.95±1.70d	6.40±1.03c	10.07±0.30c	10.56±1.04b
E	22.07±0.82e	3.97±0.34d	10.30±1.73c	13.11±2.15a
变异系数	14.83	47.44	23.56	88.50

2.6 水稳性团聚体中 MOC 的分布

2.6.1 水稳性团聚体中 MOC 的含量 由图 5 可知,土壤及>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 团聚体中 MOC 含量变化范围分别为 13.50~52.66 g/kg,0.88~21.68 g/kg,1.23~13.98 g/kg,2.59~4.33 g/kg。各土壤 MOC 含量大小为 A>B>C>D>E,差异均达显著水平。各土壤>2 mm 团聚体 MOC 含量大小为 B>A>C>D>E,其中 A 与 C 差异不显著,与其他土壤差异显著。各土壤 2~0.25 mm 团聚体 MOC 含量大小为 B>A>C>D>E,A 与 B 差异不显著,与其他土壤差异

显著。各土壤 0.25~0.053 mm 团聚体 MOC 含量大小为 D>A>E>C>B, A 与 D、C 与 E 差异不显著, 与其他土壤之间差异显著。其中 A、B、C 土壤 MOC 含量都以>2 mm 团聚体为最大, 0.25~0.053 mm 团聚体为最小, D、E 分别以 2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体 POC 含量为最大, 土壤及各级团聚体 MOC 的含量大于 POC 的含量。

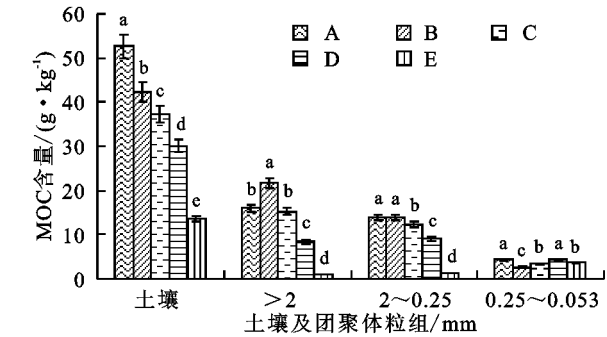
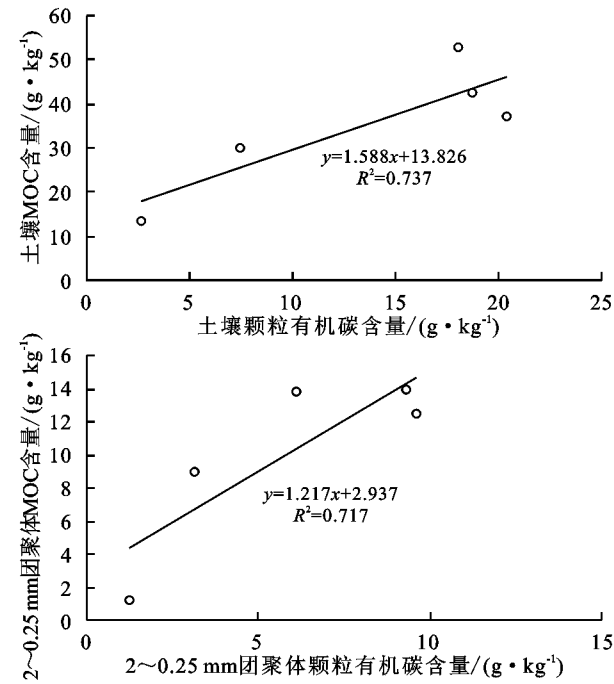


图 5 土壤及各级团聚体中矿物结合有机碳含量

2.6.2 水稳性团聚体中 MOC 的分配比例 由表 5 可知, 各类土壤及>2, 2~0.25, 0.25~0.053 mm 团聚体中 MOC 分配比例变化范围分别为 42.18%~63.96%, 7.49%~30.20%, 10.47%~28.98%, 3.60%~31.77%。各土壤 MOC 分配比例大小为 D>E>A>B>C, 其中 D 和 E 差异不显著, 但与其他土壤之间差异显著。各土壤>2 mm 团聚体 MOC



分配比例大小为 B>D>C>A>E, 其中 A 和 C 差异不显著, 但与其他土壤之间差异显著; 各土壤 2~0.25 mm 团聚体 MOC 分配比例大小为 D>C>B>A>E, 其中 A、B、C 之间差异不显著, 与其他土壤之间差异显著; 0.25~0.053 mm 团聚体 MOC 分配比例大小为 E>D>A>C>B, 其中 A 和 C 差异不显著, 但与其他土壤之间差异显著。A、B、C 土壤 MOC 分配比例均以>2 mm 团聚体为最大, 0.25~0.053 mm 团聚体为最小, D 和 E 土壤分别以 2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体 MOC 分配比例为最大。

表 5 土壤及各级团聚体中矿物结合有机碳分配比例

单位: %

土样编号	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
A	59.40±0.93b	22.18±0.72c	19.09±0.11b	5.93±0.34c
B	45.14±0.98c	30.20±1.16a	19.47±0.24b	3.60±0.40d
C	42.18±0.39d	24.19±1.15c	19.64±0.76b	5.38±0.28c
D	63.96±1.46a	27.13±2.17b	28.98±0.65a	13.94±1.15b
E	63.58±0.17a	7.49±0.76d	10.47±1.25c	31.77±0.99a
变异系数	19.01	39.50	33.54	96.34

2.7 水稳性团聚体中 POC 与 MOC 含量的关系

由图 6 可知, >2 mm 团聚体的 POC 和 MOC 含量之间呈现显著正相关关系, 相关系数为 $r=0.891$ ($P<0.05$), 各类土壤以及 2~0.25, 0.25~0.053 mm 团聚体的 POC 与 MOC 含量之间没有明显相关性。

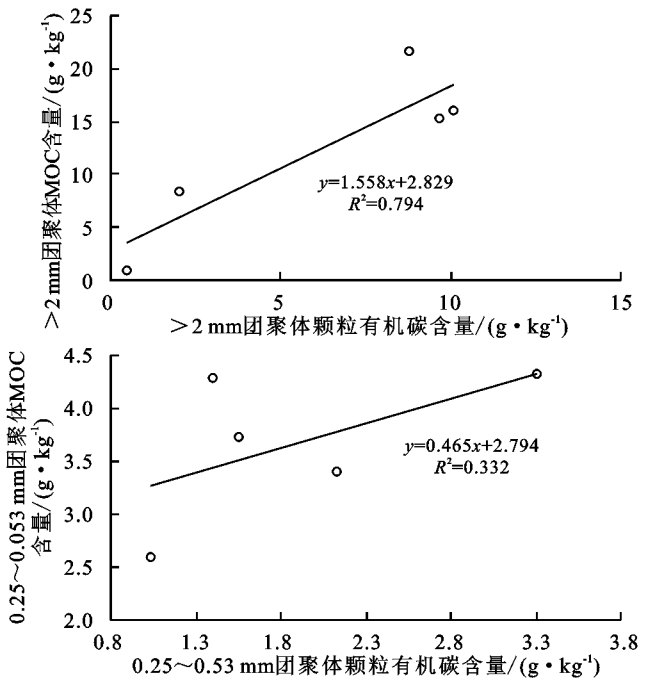


图 6 土壤及各级团聚体中颗粒有机碳含量与矿物结合有机碳含量之间的关系

3 讨论

3.1 五台山垂直带土壤有机碳的分布

本研究中, 各土壤有机碳含量呈现出亚高山草甸土>山地草甸土>棕壤>淋溶褐土>石灰性褐土的变化趋势, 而且随着海拔高度的降低, 土壤有机碳含

量的下降幅度增加。其中, 亚高山草甸土和山地草甸土的有机碳含量明显高于其他土壤, 这是由于随海拔高度的变化, 水热条件随之而变化, 形成了不同的植被类型, 在不同植被类型下土壤承接其凋落物和根系分泌物的类型不同以及气候因子等的差异, 导致形成的土壤碳

库必会存在差异。此外,亚高山草甸土和山地草甸土的成土气候寒冷,降水量大,植被以蒿草和苔草为主,覆盖度高,有较强的腐殖化过程,导致有机质的大量积累。棕壤和淋溶褐土属于凉润气候,植被以云杉、华北落叶松为主,主要以枯枝落叶的形式归还土壤,导致土壤有机质含量较高;而石灰性褐土属于农田土壤,有机质含量受施肥、耕作的影响较大,加之气候暖旱,有利于有机质的分解,故其有机质含量较低。

3.2 五台山垂直带土壤水稳性团聚体 POC 和 MOC 的分布

五台山垂直带土壤随着海拔高度的降低,土壤 POC 含量呈现先升高后降低的趋势,其中棕壤的 POC 含量最高,这与贺兰山不同海拔土壤 POC 含量随海拔高度的降低而显著降低的结果不一致^[18],不同之处主要表现在亚高山草甸土和山地草甸土中 POC 含量低于棕壤。笔者认为,导致这一结果的主要原因有三个方面:一是贺兰山区海拔从高到低植被类型为高山草甸、山地草原和荒漠草原,而五台山植被类型海拔从高到低依次为亚高山草甸、山地五花草甸、常绿针叶林、夏绿阔叶林、旱生草本、草本与农垦作物;二是研究区域土壤类型的不同,具体表现在贺兰山区域随海拔高度的降低土壤类型依次为亚高山草甸土、灰褐土、棕钙土、灰漠土和风沙土,而五台山区域随海拔高度的降低土壤类型依次为高山草甸土、山地草甸土、棕壤、淋溶褐土和石灰性褐土;三是五台山是典型旅游区,旅游活动和放牧等因素对亚高山草甸土与山地草甸土影响较大,而对棕壤影响较小。

POC 的相关性分析表明,各土壤 POC 含量与有机碳含量之间呈极显著正相关关系($r=0.971, P<0.01$),这一结果与刘梦云等^[19]不同土地利用方式 SOC 与 POC 极显著相关的结论一致。此外, >2 mm 和 $2\sim0.25$ mm 团聚体的 POC 含量与土壤有机碳含量也呈现显著正相关关系($r=0.975, P<0.01$ 和 $r=0.888, P<0.05$)。土壤及各级团聚体 MOC 的含量要明显大于 POC, MOC 的相关性分析表明,各土壤以及 >2 mm 和 $2\sim0.25$ mm 团聚体的 MOC 含量与土壤有机碳含量亦表现出显著正相关关系,相关系数分别为 $r_{\text{土壤}}=0.940 (P<0.05)$ 、 $r_{>2\text{ mm}}=0.960 (P<0.01)$ 、 $r_{2\sim0.25\text{ mm}}=0.959 (P<0.05)$,表明 MOC 是土壤碳库的主要载体。可见,随着土壤有机碳含量的增加, MOC 在各级团聚体中的含量同样会增加,这一结果与岩溶山地不同土地利用方式土壤 (MOC) 含量和土壤有机碳含量分布特征一致的结果相类似^[20],这是由于 MOC 在土壤有机碳长期固持中起到的关键作用所致。

4 结论

(1)五台山亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤、淋溶褐土的团聚体组成以大团聚体为主,石灰性褐土以微团聚体为主。山地草甸土的团聚体稳定性最高,土壤的保水保肥能力强,而石灰性褐土的团聚体稳定性最差。海拔高度越高的土壤其大团聚体颗粒组成越大,而微团聚体颗粒组成越小。

(2)亚高山草甸土、山地草甸土、棕壤的有机碳主要富集在 >2 mm 团聚体中,碳截获和固持能力较强,淋溶褐土和石灰性褐土的有机碳分别主要集中在 $2\sim0.25$ mm 和 $0.25\sim0.053$ mm 团聚体中,碳截获和固持能力较弱。

(3)五台山土壤中大团聚体所固定的 POC 和 MOC 含量与土壤有机碳含量呈现显著正相关关系,土壤及各级团聚体 MOC 含量明显高于 POC 含量。此外,各土壤 POC 和 MOC 的含量与土壤有机碳含量也显著正相关,且各土壤 >2 mm 团聚体中 POC 和 MOC 含量呈现显著正相关关系。

参考文献:

- [1] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532(7597): 49-57.
- [2] 程曼,朱秋莲,刘雷,等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2835-2843.
- [3] 蔡岸冬,徐香茹,张旭博,等. 不同利用方式下土壤矿物结合态有机碳特征与容量分析[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(21): 4291-4299.
- [4] 唐光木,徐万里,周勃,等. 耕作年限对棉田土壤颗粒及矿物结合态有机碳的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 27(3): 237-241.
- [5] 樊红柱,秦鱼生,陈庆瑞,等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1473-1480.
- [6] 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.
- [7] 徐文静,丛耀辉,张玉玲,等. 黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳及其颗粒有机碳的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 210-215.
- [8] 任雅阁,马玲玲,成杭新,等. 典型农耕地褐土水稳性团聚体有机碳的分布及组成[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 15-19.
- [9] 姬强,孙汉印,王勇,等. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对 4 种耕作措施的响应[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 132-137.
- [10] 于法展,张茜,张忠启,等. 庐山不同森林植被对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 15-19.