

# 黑垆土有机碳在团聚体中的分配及其保护机制<sup>①</sup>

汪超<sup>1,2</sup>, 李福春<sup>1\*</sup>, 阚尚<sup>1</sup>, 田智宇<sup>1</sup>, 周静<sup>2</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 常州市环境科学研究院, 江苏常州 213022)

**摘要:**以黄土高原广泛分布的黑垆土为研究对象,研究了6个粒级团聚体中总有机碳(TOC)、稳定性有机碳(StOC)、矿物保护态有机碳(MOC)、化学稳定性有机碳(ROC)和游离氧化铁( $Fe_d$ )、无定形氧化铁( $Fe_o$ )、络合态氧化铁( $Fe_p$ )以及黏土矿物含量的特征,重点分析了有机碳在各粒级团聚体中的分配及其与黏土矿物和各种形态氧化铁之间的相关性,及探讨了有机碳的保护机制。结果表明:黑垆土中约80%的土壤有机碳赋存于0.5~0.25、0.25~0.05和<0.05 mm的3个粒级团聚体中;黑垆土中的有机碳以StOC为主,其含量随着团聚体粒级的减小而增加。在0.5~0.25和0.25~0.05 mm团聚体中,TOC含量与 $Fe_d$ 含量呈正相关关系,相关性系数( $r$ )均为0.72 ( $P<0.05$ );在0.25~0.05 mm粒级团聚体中,ROC含量与 $Fe_d$ 含量呈正相关关系( $r=0.68$ ,  $P<0.05$ ),而StOC和MOC含量与伊利石含量具有正相关关系  $r$ 分别为0.71( $P<0.05$ )和0.68( $P<0.05$ )。黑垆土中对有机碳起保护作用的主要是 $Fe_d$ 和伊利石,但二者对有机碳的保护机制可能有所不同: $Fe_d$ 与有机碳络合形成化学稳定性有机碳,而伊利石主要通过吸附作用实现对有机碳的保护。

**关键词:**黑垆土;团聚体;有机碳;铁氧化物;黏土矿物

**中图分类号:** X142

土壤作为陆地生态系统最大的碳库,其中有机碳的固定和周转与大气 $CO_2$ 密切相关<sup>[1]</sup>。土壤团聚体由无机物质和有机物质胶结而成,是土壤的基本结构单位。团聚体粒度的大小对土壤结构、养分保持和土壤有机碳的矿化有重要影响<sup>[2]</sup>。对各粒级土壤团聚体中有机碳含量和矿物组成的研究有助于揭示有机碳的保护机制<sup>[3]</sup>。

在我国,涉及土壤团聚体的研究工作主要集中在其结构及稳定性方面,而且这些工作主要是针对水稻土和黑土开展<sup>[4-5]</sup>。有关土壤有机碳在各粒级团聚体中的分配及其与矿物相关性的研究报道极少。黄土高原是我国主要的农业产区,其典型的地带性土壤为黄土母质上发育的黑垆土。黑垆土中有机碳保存机制的研究不仅可为评价黄土高原土壤质量和农业可持续发展提供依据,而且还影响到对该地区土壤碳库大小及其稳定性的理解。我国土壤学家针对黑垆土开展的研究工作主要在土壤养分方面<sup>[6-7]</sup>,还有部分文献报道了黑垆土中有机碳与矿物的关系以及施肥对团聚体稳定性的影响<sup>[8-9]</sup>。据本研究所掌握的文献,目前尚无有关黑垆土团聚体中有机碳分配及其与矿物相

关性的研究报道。由此,本文利用湿筛法将采自陕西省宝鸡市的黑垆土样品分为6个粒级的团聚体,测定了各团聚体中总有机碳(TOC)、稳定性有机碳(StOC)、矿物保护态有机碳(MOC)、化学稳定性有机碳(ROC)和3种形态的铁氧化物以及黏土矿物的含量,讨论了有机碳与氧化铁、黏土矿物的相关性,以尝试阐明黑垆土中有机碳的可能保护机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究所用样品采集于地处黄土高原南部的宝鸡市辖区。宝鸡市年均降水量为584 mm,年均温 $9.1^{\circ}C$ ,属暖温带半湿润大陆性气候。土壤类型为黑垆土,母质为深厚的中壤质马兰黄土。在黄土塬面上分4个区采集样品:宝陵村( $107^{\circ}07'50''E$ ,  $34^{\circ}25'18''N$ )1个样品,样品编号ZR,为自然发育的黑垆土,植被为杂草;宝陵村( $107^{\circ}06'52''E$ ,  $34^{\circ}25'22''N$ ),样品编号BLC;陵辉村( $107^{\circ}07'36''E$ ,  $34^{\circ}25'15''N$ ),样品编号LHC;胜利村( $107^{\circ}07'52''E$ ,  $34^{\circ}23'15''N$ ),样品编号为SLC。后3个采样区均为种植小麦

基金项目:国家自然科学基金项目(40971138)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZZD-EW-04-02)、中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室开放课题(SKLLQG1111)和常州科技支撑计划(社会发展)项目(CE20125010)资助。

\* 通讯作者(fchli@njau.edu.cn)

作者简介:汪超(1989—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事土壤地球化学方面的研究。E-mail: 2011103099@njau.edu.cn

的农田土壤,采样时当季小麦已收割,并可见秸秆还田痕迹。鉴于采样区田块均为长条形,因而采用 50 m 间隔的直线采样法,在后 3 个采样区中各采集 3 个样品。

## 1.2 实验方法

采用萨维诺夫法分离和提取土壤水稳性团聚体<sup>[10]</sup>。称取 50 g 土样至底部铺有滤纸的浅玻璃杯中,然后从边缘慢慢地加水,使土壤吸水达到饱和;将其放入水中的套筛内(其孔径从上至下依次为 2、1、0.5、0.25 和 0.05 mm),上下匀速振荡 30 次;之后将振荡架慢慢升起,使套筛离开水面,用洗瓶分别冲洗筛子于不同的铝盒中,倒去上层清液后在烘箱内蒸干,即得到不同粒级的水稳性团聚体(称重精确至 0.000 1 g)。

取 20 g 已烘干的各粒级团聚体样品,分别用浓度约为 3 mol/L 的盐酸和浓度约为 10 mol/L 的双氧水去除碳酸盐和有机质,然后洗去多余的盐基离子并转移到 1 000 ml 量筒中制成悬浊液;根据 Stokes 定律用沉降-虹吸法将样品分成黏粒(<2 μm)、粉砂粒(2~20 μm)和细砂粒(20~200 μm)3 个粒级组分。对黏粒样品分别进行 MgCl<sub>2</sub> 饱和、MgCl<sub>2</sub> + 甘油饱和、KCl 饱和以及 KCl 饱和后加热(550℃, 2 h)共 4 种处理。将上述黏粒、粉砂粒和细砂粒样品制成定向风干片,利用 D<sub>max</sub>-B 型 X 射线衍射仪(XRD)进行测定。测试条件为:Cu 靶,管压 35 kV,管流 20 mA,扫描速度(2θ)2°/min,扫描范围为 3°~60°(2θ)。

按稳定性不同将土壤总有机碳(TOC)分为稳定性有机碳(StOC)、矿物保护态有机碳(MOC)、化学稳定性有机碳(ROC)。StOC 和 ROC 的主要提取过程如下<sup>[11]</sup>:取 15 g 团聚体样品加入 150 ml 浓度为 6% 的 NaOCl 溶液,并用浓度约为 10 mol/L 的盐酸将悬浊液的 pH 调至 8.0;在 25℃左右的温度条件下提取 3 次(每次 6 h)后以 4 000 r/min 的转数离心 10 min;倒出上清液,用 1 mol/L 的 NaCl 溶液将残留固相清洗两次,加去离子水振荡过夜,然后对振荡液进行透析,直至悬浊液的电导率小于 40 μS/cm 为止;最后把残留的固相部分冷冻干燥,其中的有机碳即为 StOC。称取经 NaOCl 处理的上述冷冻干燥样品 6.0 g,加入 40 ml 浓度为 5.64 mol/L 的氢氟酸,震荡提取 2 次(每次 4 h)后再离心 10 min;倒去上清液,用 40 ml 去离子水清洗 5 次后冷冻干燥,其中的有机碳即为 ROC。采用外加热法,重铬酸钾-硫酸法测定样品中的碳含量<sup>[12]</sup>,分别获得 StOC 和 ROC 含量。用差减法求得 MOC 含量,即 MOC = StOC - ROC。

根据熊毅<sup>[13]</sup>提出的方法提取和测定各形态铁氧

化物含量。连二亚硫酸钠-柠檬酸钠法提取游离氧化铁(Fe<sub>d</sub>)称取团聚体样品 0.5 g,置于 25 ml 离心管中,加入 10 ml 柠檬酸钠缓冲液,再加 0.5 g 连二亚硫酸钠;加塞后,在 50℃水浴锅上手缓慢摇动 30 min;待冷却后将悬浊液用滤纸过滤,滤液定容于 100 ml 容量瓶,待测。用草酸铵法提取无定形氧化铁(Fe<sub>o</sub>):称取 3.0 g 团聚体样品置于三角瓶中,用遮光布将三角瓶包裹避光,再加入 150 ml 浓度为 0.2 mol/L 草酸铵溶液(pH 3.0),加塞避光振荡 2 h 后立即倾入离心管进行分离,并将离心后的上清液定容于 50 ml 容量瓶中,待测。用焦磷酸钠法提取络合态氧化铁(Fe<sub>p</sub>):称取 3.0 g 团聚体样品置于三角瓶中,加入 60 ml 新配制的 0.1 mol/L 焦磷酸钠溶液(内含浓度为 1 mol/L 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH 8.5),放置过夜,然后对振荡液进行离心,并将离心后的上清液定容于 50 ml 容量瓶中,待测。采用邻菲罗啉比色法测定用上述方法提取的各形态铁含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤团聚体的组成

在 6 个粒级的土壤团聚体中,0.5~0.25、0.25~0.05 和 <0.05 mm 3 个粒级含量较高(图 1),其变化范围分别为 31.50~269.18 g/kg(平均为 197.13 g/kg)、344.93~522.43 g/kg(平均为 411.93 g/kg)和 237.94~377.02 g/kg(平均为 281.39 g/kg)。与自然发育黑垆土(ZR)相比,耕作土壤中 0.5~0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量明显增加,平均增幅为 20.70%;而 <0.25 mm 粒级的团聚体则相反。

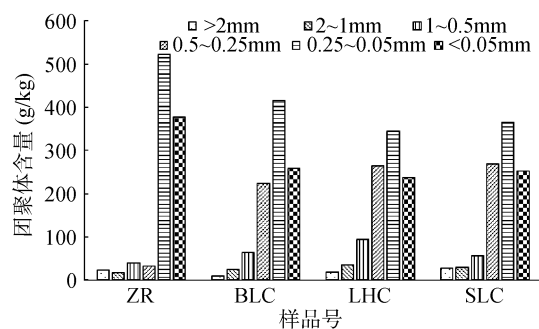


图 1 黑垆土中各粒级水稳性团聚体的含量

Fig. 1 Contents of water stable aggregates with different particle sizes in Heilu soils

### 2.2 团聚体中有机碳的组成

测定结果表明,团聚体中 TOC 含量变化于 8.18~27.69 g/kg。从图 2 可以看出明显的趋势,即无论是自然发育黑垆土还是耕作黑垆土,团聚体中 TOC 含量均与粒级有关,粒级越小,TOC 含量越低。这可能是因为大团聚体是由新形成的有机碳胶结小团聚

体而成<sup>[14]</sup>。Jastrow 等<sup>[15]</sup>的研究也表明大团聚体比微团聚体含更多的有机碳，<sup>13</sup>C 示踪结果还证实了微团聚体中有机碳的形成时间早于大团聚体。

从图 2 还可以看出，自然发育黑垆土各粒级团聚体中 TOC 含量均分别高于耕作土壤中相应粒级。粒级越大，这种差异越明显：0.25 ~ 0.5 mm 粒级团聚体中相差 3.04 g/kg，0.5 ~ 1 mm 粒级团聚体中相差 3.86 g/kg，1 ~ 2 mm 粒级团聚体中相差 9.28 g/kg，而 >2 mm 粒级团聚体中相差达 9.44 g/kg。这表明耕作促进了团聚体(尤其是大团聚体)中有机碳的分解。这可能是由于新输入的有机碳优先聚集在大团聚体中，大团聚体的形成比微团聚体快，而其中有机碳的矿化也快<sup>[2]</sup>。Six 等<sup>[3]</sup>认为，大团聚体更有利于体现土地利用方式和耕作措施对团聚体中有机碳的影响，而微团聚体内的有机碳则维持在较稳定的水平上。

土壤团聚体组成的分析结果表明，<0.5 mm 粒级的团聚体为黑垆土的主体，其所占比重接近 80%。为此，本研究测定了<0.5 mm 各粒级团聚体的 StOC 和

ROC 含量等指标(表 1)。结果表明，0.5 ~ 0.25、0.25 ~ 0.05 和 <0.05 mm 粒级团聚体的 ROC/StOC 百分比介于 24.99% ~ 45.81%，MOC/StOC 百分比介于 54.19% ~ 75.01%。说明土壤中的 StOC 主要以矿物保护态为主。团聚体粒级越小，StOC 占 TOC 的比重越大。例如，0.5 ~ 0.25、0.25 ~ 0.05 和 <0.05 mm 粒级团聚体，该比值(平均)分别为 58.21%、61.54% 和 70.02%。

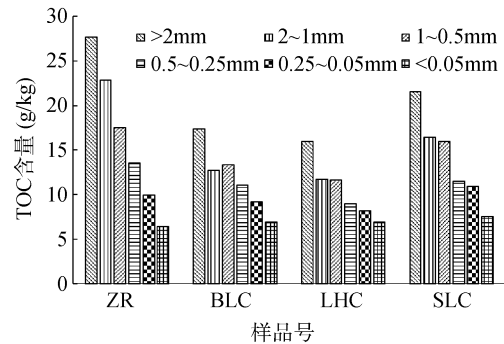


图 2 不同粒级团聚体中 TOC 的含量  
Fig. 2 Contents of total organic carbon in aggregates with different particle sizes

表 1 团聚体中各种形态有机碳含量和相关比值

Table 1 Contents and ratios of various organic carbon in aggregates with different particle sizes

样品编号	粒级(mm)	TOC(g/kg)	StOC(g/kg)	MOC(g/kg)	ROC(g/kg)	StOC/TOC(%)	MOC/StOC(%)	ROC/StOC(%)
ZR	0.5 ~ 0.25	13.56	6.86	3.72	3.14	50.55	54.19	45.81
	0.25 ~ 0.05	9.97	5.51	3.24	2.27	55.28	58.72	41.28
	<0.05	6.42	4.13	2.81	1.32	64.31	68.14	31.86
BLC	0.5 ~ 0.25	11.09	6.22	3.60	2.62	56.06	57.88	42.12
	0.25 ~ 0.05	9.14	5.31	3.16	2.15	58.11	59.46	40.54
	<0.05	6.88	4.74	3.56	1.18	68.85	75.01	24.99
LHC	0.5 ~ 0.25	8.96	5.56	3.48	2.08	62.04	62.57	37.43
	0.25~0.05	8.18	5.71	3.79	1.91	69.82	66.46	33.54
	<0.05	6.89	5.12	3.43	1.69	74.34	66.94	33.06
SLC	0.5 ~ 0.25	11.52	7.91	4.86	3.05	68.66	61.39	38.61
	0.25 ~ 0.05	10.93	7.27	4.59	2.68	66.52	63.16	36.84
	<0.05	7.51	5.29	3.44	1.84	70.40	65.15	34.85
平均		9.25	5.80	3.64	2.16	62.69	62.72	37.28

### 2.3 团聚体中铁氧化物含量及其与有机碳的相关性

测定结果表明，各粒级团聚体中  $Fe_d$ 、 $Fe_o$  和  $Fe_p$  含量的平均值分别为 10.99、2.19 和 0.07 g/kg(表 2)。可见，黑垆土中铁氧化物主要以  $Fe_d$  和  $Fe_o$  形态存在。 $Fe_d$  作为土壤中含量最高的铁氧化物，它与 0.5 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中 TOC 含量以及 0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中 ROC 含量都具有良好的相关性(图 3)，相关性系数  $r$  分别为 0.72( $P<0.05$ )、0.72( $P<0.05$ )和 0.68( $P<0.05$ )。 $Fe_o$  和  $Fe_p$  与有机碳及其各组分之间没有显著的相关性，说明  $Fe_d$  对 0.5 ~ 0.05 mm

粒级团聚体中有机碳的保护最为重要。铁氧化物对有机碳的吸附模式有：阴离子交换、配体交换、表面配位、疏水性作用、熵效应、氢键作用及阳离子桥键<sup>[16]</sup>。在铁氧化物吸附有机碳形成矿物-有机碳复合体的界面作用过程中，分子量大的疏水性胡敏酸较分子量小的亲水性富里酸更容易在其表面上吸附，且吸附量随芳香碳含量的增加而增大，或随 O/C 比值的减小而增大<sup>[17]</sup>。有机物输入土壤后优先进入大团聚体，在此后的矿化和腐殖化过程中逐渐转移进入其他粒级团聚体中<sup>[18]</sup>。0.5 ~ 0.05 mm 粒级团聚体作为黑垆土

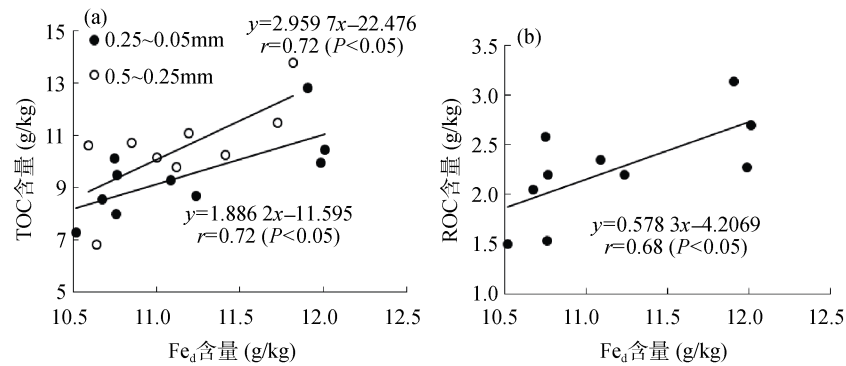


图 3 0.5 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中  $Fe_d$  与 TOC (a)、0.5 ~ 0.25 mm 粒级团聚体中  $Fe_d$  与 ROC (b) 的相关性  
Fig. 3 Correlations between  $Fe_d$  and TOC of aggregates with particle sizes of 0.5 – 0.25 mm and 0.25 – 0.05 mm (a), between  $Fe_d$  and ROC of aggregates with particle size of 0.5 – 0.25 mm (b)

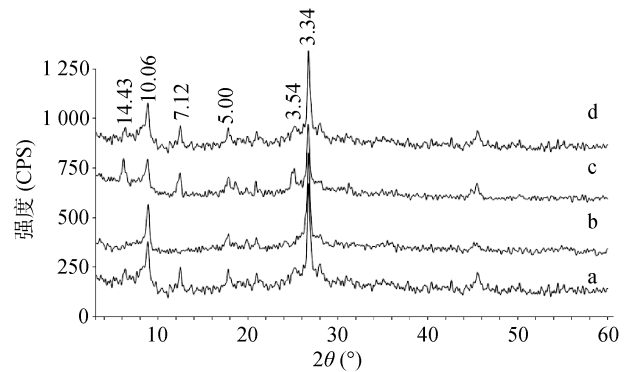
的主要组分，其中的有机碳可能与  $Fe_d$  更容易结合。ROC 与  $Fe_d$  较显著的相关性也暗示，铁氧化物对有机碳具有一定的保护作用<sup>[19]</sup>。

#### 2.4 团聚体中黏土矿物含量及其与有机碳的相关性

从各样品中提取的黏土矿物具有大体上一致的 XRD 图谱。本文以 BLC-1 样品 <0.05 mm 粒级团聚体中黏粒为例展示黏土矿物的定性鉴定依据(图 4)。各种处理后的 XRD 图谱中都存在  $d$  值为  $10.06 \times 10^{-10}$ 、 $5.00 \times 10^{-10}$  和  $3.34 \times 10^{-10}$  m 的衍射峰，说明样品中含有伊利石。在  $MgCl_2$  饱和处理的图谱中存在  $d$  值为  $14.43 \times 10^{-10}$  m 的衍射峰，在甘油饱和处理后该峰位置没有发生明显的移动，说明样品中含有蛭石。KCl 饱和处理的图谱中出现  $d$  值为  $7.12 \times 10^{-10}$  m 和  $3.54 \times 10^{-10}$  m 的衍射峰，它们在  $550^\circ C$  条件下加热 2 h 后消失，这说明样品中含有高岭石。据此可以确定，供试土壤黏粒中的主要矿物为蛭石、高岭石和伊利石。

采用积分强度法对黏粒中矿物含量进行计算。其中，

伊利石、高岭石和蛭石的系数分别为 3、2 和  $1.5^{[13]}$ 。从表 2 可以看出，伊利石含量最高，平均为 591.80 g/kg，蛭石和高岭石平均含量分别为 148.25 g/kg 和 259.95 g/kg。



(a : KCl 饱和； b : KCl 饱和+加热； c :  $MgCl_2$  饱和；  
d :  $MgCl_2$  饱和+甘油饱和)

图 4 BLC-1 样品 <0.05 mm 粒级团聚体中黏粒的 XRD 图谱(单位:  $10^{-10}$  m)

Fig. 4 XRD patterns of clay particles of aggregates (<0.5 mm) from BLC-1 (unit of  $d$ -values is  $10^{-10}$  m)

表 2 团聚体中铁氧化物和黏土矿物含量(g/kg)  
Table 2 Contents of iron oxides and clay minerals of different size aggregates

样品编号	粒级(mm)	$Fe_d$	$Fe_o$	$Fe_p$	蛭石	伊利石	高岭石
ZR	0.5 ~ 0.25	—	—	—	98.97	666.44	234.59
	0.25 ~ 0.05	11.99	2.19	0.08	108.92	548.70	342.38
	<0.05	10.61	2.23	0.08	154.95	622.28	222.78
BLC	0.5 ~ 0.25	11.26	2.3	0.08	176.46	631.00	192.54
	0.25 ~ 0.05	10.86	2.29	0.07	192.85	521.45	285.70
	<0.05	10.72	2.19	0.06	138.68	568.14	293.17
LHC	0.5 ~ 0.25	11.06	2.3	0.06	142.46	553.68	303.86
	0.25 ~ 0.05	10.81	2.2	0.06	135.84	619.20	244.96
	<0.05	10.48	2.2	0.07	190.46	494.79	314.75
SLC	0.5 ~ 0.25	11.14	2.14	0.08	86.88	675.66	237.46
	0.25 ~ 0.05	11.56	2.05	0.07	157.14	643.13	199.73
	<0.05	10.36	1.98	0.09	195.43	557.08	247.49
平均		10.99	2.19	0.07	148.25	591.80	259.95

注：ZR 中 0.5 ~ 0.25 mm 粒级团聚体样品量不足，因而未测定其中铁氧化物含量。

0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中的 StOC 和 MOC 含量与伊利石的含量呈正相关,  $r$  分别为 0.71( $P < 0.05$ ) 和 0.68( $P < 0.05$ )(图 5)。蛭石、高岭石含量与 TOC 及其各组分含量之间均无显著的相关性, 说明黑垆土中伊利石对有机碳的保护作用更为重要。前人在实验中发现, 大部分有机质强烈吸附于黏土矿物表面, 且黏土矿物吸附有机质的能力与有机质的性质、黏土矿物比表面积、阳离子交换量和土壤含水量、pH 等因素有关<sup>[20-22]</sup>。2:1 型黏土矿物(蒙脱石、伊利石等)具有较大的比表面积和较高的阳离子交换量,

其固定有机碳的能力强于 1:1 型黏土矿物(高岭石等)<sup>[23]</sup>。尽管伊利石为 2:1 型非膨胀黏土矿物(内表面积较小), 但其仍可由于具有较高的阳离子交换量和比表面积而成为保护有机碳的主要黏土矿物。与铁氧化物的情况相类似, 黏土矿物对有机碳的保护作用也主要体现在 0.25 ~ 0.05 mm 粒级的团聚体中。伊利石含量与 MOC 含量显著相关而与 ROC 含量不相关, 说明伊利石对有机碳的保护方式可能不是形成化学稳定的矿物-有机碳复合体, 而是简单的吸附作用。

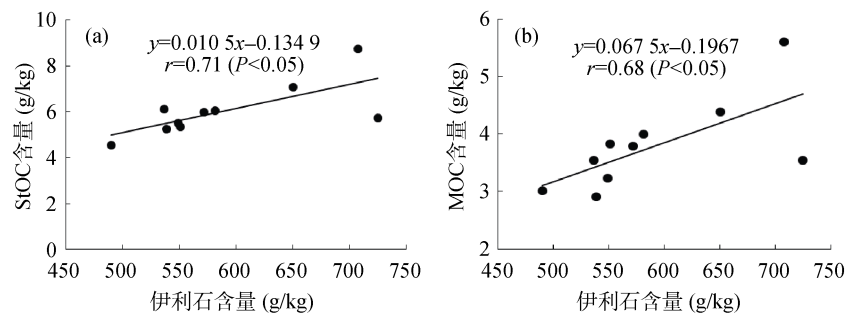


图 5 伊利石与 0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中 StOC(a)和 MOC(b)的相关性

Fig. 5 Correlations of illite with contents of StOC (a) and MOC (b) in aggregates with particle size of 0.25-0.05mm

### 3 结论

1) 黑垆土中土壤团聚体 TOC 含量均与粒级有关, 粒级越小, TOC 含量越低; 大约 80% 的土壤有机碳赋存于 <0.5 mm 的组分(即 0.5 ~ 0.25、0.25 ~ 0.05 和 <0.05 mm 3 个粒级的团聚体)中; 有机碳以相对稳定的有机碳为主, 其中 MOC 占优势; StOC 含量有随着团聚体粒级减小而增加的趋势。

2) 在团聚体的铁氧化物中,  $Fe_d$  含量最高。 $Fe_d$  含量与 0.5 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中 TOC 含量以及 0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中 ROC 含量呈显著正相关关系,  $r$  分别为 0.72( $P < 0.05$ )、0.72( $P < 0.05$ )和 0.68( $P < 0.05$ )。在有机碳的矿化和腐殖化过程中, 0.5 ~ 0.05 mm 粒级中  $Fe_d$  更容易吸附有机碳并与其络合形成 ROC。

3) 在黑垆土的黏粒中主要存在 3 种黏土矿物。其中, 伊利石含量最高(平均为 591.80 g/kg), 其次为蛭石和高岭石。0.25 ~ 0.05 mm 粒级团聚体中的 StOC 与 MOC 含量与伊利石含量显著正相关,  $r$  分别为 0.71( $P < 0.05$ )和 0.68( $P < 0.05$ )。伊利石具有较高的阳离子交换量和比表面积, 在 0.25 ~ 0.05 mm 团聚体中更容易吸附并保护有机碳。

### 参考文献:

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate

change and food security[J]. Science, 2004, 304 (5 677): 1 623-1 627

- [2] Rabbi SM, Wilson BR, Lockwood PV, Daniel H, Young IM. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses[J]. Geoderma, 2014, 216: 10-18
- [3] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79: 7-31
- [4] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 江春玉. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳, 氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950-960
- [5] 姜义亮, 郑粉莉, 王彬, 温磊磊, 沈海鸥, 易祎. 东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 1-8
- [6] 赵云英. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1 273-1 279
- [7] 裴瑞娜, 杨生茂, 徐明岗, 樊廷录, 张会民. 长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 4 008-4 015
- [8] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 丁宁平. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 300-309
- [9] 霍琳, 武天云, 简海明, 曹诗瑜, 唐文雪. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 545-550
- [10] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978

- [11] Mikutta R, Kleber M, Torn MS, Jahn R. Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance?[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77: 25–56
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30–32
- [13] 熊毅. 土壤胶体(二)[M]. 科学出版社, 1985: 245–268
- [14] Puget P, Chen C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595–605
- [15] Jastrow JD, Boutton TW, Miller RM. Carbon dynamic of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 801–807
- [16] Wang C, Li FC, Shi HZ, Jin ZD, Sun XH, Zhang F, Wu F, Kan S. The significant role of inorganic matters in preservation and stability of soil organic carbon in the Baoji and Luochuan loess/paleosol profiles, Central China[J]. *Catena*, 2013, 109: 186–194
- [17] Meier M, Namjesnik-Dejanovic K, Maurice PA, Chin YP, Aiken GR. Fractionation of aquatic natural organic matter upon sorption to goethite and kaolinite[J]. *Chemical geology*, 1999, 157(3): 275–284
- [18] 刘骅, 佟小刚, 马兴旺, 王西和, 张文菊, 许咏梅, 徐明岗. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳的含量及其演变特征[J]. *应用生态学报*, 2010(1): 84–90
- [19] Wissing L, Kölbl A, Schad P, Bräuer T, Cao ZH. Organic carbon accumulation on soil mineral surfaces in paddy soils derived from tidal wetlands[J]. *Geoderma*, 2014, 228: 90–103
- [20] Saidu AR, Smernik RJ, Baldock JA, Kaiser K, Sanderman J. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide[J]. *Geoderma*, 2013, 209: 15–21
- [21] Feng X, Simpson AJ, Simpson MJ. Chemical and mineralogical controls on humic acid sorption to clay mineral surfaces[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36 (11): 1 553–1 566
- [22] Kahle M, Kleber M, Jahn R. Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area, cation exchange capacity and dithionite-extractable iron[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53 (4): 639–644
- [23] 师焕芝, 李福春, 孙旭辉, 吴枫, 罗旭鹏, 李学林, 金章东. 洛川黄土/古土壤中有机碳的分布特征及其与粘土矿物的相关性[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1 355–1 362

## Distribution and Preservation Mechanisms of Organic Carbon in Aggregates of Heilu Soil

WANG Chao<sup>1,2</sup>, LI Fu-chun<sup>1\*</sup>, KAN Shang<sup>1</sup>, TIAN Zhi-yu<sup>1</sup>, ZHOU Jing<sup>2</sup>

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Changzhou Academy of Environmental Sciences, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

**Abstract:** This paper mainly studied the distributions of total organic carbon (TOC), stable organic carbon (StOC), mineral-protected organic carbon (MOC), recalcitrant organic carbon (ROC) and their correlations with the contents of clay minerals and different forms of iron oxides ( $Fe_p$ ,  $Fe_o$  and  $Fe_d$ ) for aggregates with six particle sizes of Heilu soil which is widely distributed in the Loess Plateau, and discussed the preservation mechanisms of organic carbon. The results showed that about 80% of the organic carbon existed in fraction with particle size less than 0.5 mm; the StOC was the main components of organic carbon, and it increased with the decrease of particle size; the TOC content positively correlated with the  $Fe_d$  content with correlation coefficients  $r$  of 0.72 ( $P < 0.05$ ) in 0.5–0.25 mm and 0.25–0.05 mm aggregates, and the ROC content positively correlated with the  $Fe_d$  content too, with  $r$  of 0.68 ( $P < 0.05$ ) in 0.25–0.05 mm aggregates. The contents of StOC and MOC in 0.25–0.05 mm aggregates positively correlated with the content of illite, with  $r$  of 0.71 ( $P < 0.05$ ) and 0.68 ( $P < 0.05$ ), respectively.  $Fe_d$  might maintain soil organic carbon by complexation, while illite preserves SOC by adsorption.

**Key words:** Heilu soil, Aggregate, Organic carbon, Iron oxide, Clay minerals