

黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究

郭玉文^{1,2} 加藤 诚¹

(1 东京农工大学, 日本东京; 2 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

宋 菲³

(3 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

张玉龙⁴

(4 沈阳农业大学资源与环境学院, 沈阳 110161)

曾思伟⁵ 王得楷⁵

(5 甘肃省科学院地质自然灾害研究所, 兰州 730000)

摘 要 通过团粒分析、电子显微镜(SEM/EDX)扫描等元素分析扫描方法和手段,对黄土高原西北部自然黄土中的团粒数量及其与碳酸钙的溶解量的关系、团粒表面和内部碳酸钙的分布进行了研究。结果表明:碳酸钙大约参与了99%的团粒形成,呈现团粒越大,碳酸钙含量越多的趋势;反之,团粒数量与碳酸钙的溶解量成反比;随着团粒表面碳酸钙分布的减少,附着在团粒表面的微团粒及粉粒、粘粒减少;在团粒内部,碳酸钙与矿物颗粒之间存在3种胶结方式,分别为碳酸钙附着在矿物颗粒表面、碳酸钙分布于矿物颗粒之间以及碳酸钙表面附着矿物颗粒。实验结果证明了黄土团粒的主要胶结物是碳酸钙这一理论。

关键词 黄土; 团粒; 碳酸钙; 矿物颗粒; SEM/EDX

中图分类号 S155.2, S152.4

文献标识码 A

黄土高原地区,土壤中的团粒有保持土壤肥力、减少水土流失方面的重要作用。从土壤结构稳定性的角度考虑,团粒也是构成黄土结构的基本骨架颗粒之一。因此,无论是从土壤学的角度,还是用岩土力学观点来看,研究黄土团粒都具有十分重要的意义。

有关黄土团粒的研究曾有过一些报道。刘东生等^[1]认为,在黄土堆积形成过程中,次生碳酸盐与黄土粉尘中粘粒物质结合形成微团聚体,这些微团聚体是形成黄土团粒的前身。王永焱等^[2]认为,黄土的骨架颗粒主要是 > 0.005 mm(尤其是 > 0.01 mm)的碎屑颗粒和团粒;团粒是由大量的细粒碎屑和少量的粘粒物质由微晶态碳酸钙(CaCO_3)胶结而成,是土壤的微结构特征之一。张宗祜^[3]等研究了不同湿陷类型的黄土结构单元中水稳性团粒的类型和含量变化,并指出黄土中 > 0.05 mm的水稳性团粒的含量与黄土湿陷系数成反比关系。在黄土中的碳酸钙

含量及其存在形态方面,刘东生^[1,4]、高国瑞^[5]、王永焱^[6]等都进行过系统研究。综观有关黄土团粒及碳酸钙方面的资料可以看出,很多专家学者认为黄土团粒的胶结物主要是碳酸钙,但目前尚未见到充分证明这一理论报道。

长期以来,人们一直借助偏光显微镜和电子扫描显微镜来观察黄土团粒的大小、形状等微观结构特征。王永焱和张宗祜^[7]、张宗祜等^[3]根据团粒结构特征将其分为6种类型,即(1)镶嵌型,(2)网格型,(3)角砾型,(4)附着型,(5)基底型,(6)复合型。近年来,分析扫描电子显微镜(SEM/EDX)被开发出来并已开始在一些领域应用。该显微镜除具备一般扫描电子显微镜功能以外,可以通过X-射线扫描观察材料的微小部位,利用元素 Mapping 对该部位的元素分布进行测定。这一方面的应用研究,目前在材料科学领域已有报道^[8],但黄土研究领域目前尚未见有关元素 Mapping 的应用报道。

此外, 借鉴于土壤薄片观察方法, 利用树脂固定的土壤团粒切断材料, 通过 SEM/EDX 可以实现对土壤团粒间分布物质进行测定的目的。因此, 本论文以黄土高原西北部地区自然黄土为试材, 通过团粒分析实验测定其数量, 探讨团粒与碳酸钙淋溶的关系的同时, 利用 EDX 对土壤团粒进行元素分析, 借助于元素 Mapping 对团粒表面和内部碳酸钙的分布进行测定, 以此来证明前人提出的黄土团粒的胶结物主要是碳酸钙这一理论。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

本实验采样地点黑方台位于中国甘肃省永靖县北部, 属于黄河北岸 4 级阶地。海拔 1 700~ 1 740 m。36°05' N, 103°16' E。年平均降水量 316 mm, 主要集中在 6~ 8 月, 年蒸发量 1 689 mm。属于半干旱气候。

1.2 供试土壤

采集自然土壤的非扰动土做为供试土壤, 其平均容重为 1.32 g cm^{-3} , 天然含水量 $6.4 \times 10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$ 表示, pH 7.9, CaCO_3 含量为 261.0 g kg^{-1} ; 粒级组成为砂粒 64.5 g kg^{-1} , 粉粒 773.5 g kg^{-1} , 粘粒 162.0 g kg^{-1} , 属粉砂质粘壤土。

1.3 实验方法

在室温条件下将土样风干保存。

1.3.1 粒级组成实验 本实验参照 JIS A 1204^[9] 和华孟等^[10] 的土壤粒径分析方法, 在 20℃ 恒温条件下进行粒级组成实验, 求其均重直径 (MWD)。另外, 参照日本土壤肥料学会的粒径分析方法^[11], 重复上述实验, 将充分分散后的土壤悬浊液移到 1 000 ml 量筒中并定容, 在沉降分析进行 4 min 48 s 和 8 h 时用吸管分别采集 10 cm 深度的悬浊液 20 ml, 前者为粉粒和粘粒的混合物, 而后者则为粘粒。采集完粉粒和粘粒的悬浊液过筛, 分别采取粗砂 (0.5~ 0.25 mm) 和细砂 (0.25~ 0.1 mm)。利用 EDX 对采集的砂粒 (粗砂和细砂)、粉粒和粘粒样品进行元素分析。

1.3.2 团粒分析实验 称取上述风干土约 50 g, 在 pH 1.4 条件下饱和。饱和后供试材料分别进行 A、B、C、D、E 处理。A. 水饱和处理: 饱和后的供试材料放进密封容器保存 12 h。B. $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{HCl}$ 处理: 在 500 ml 的烧杯中加入 250 ml $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{HCl}$, 然后把饱和后的供试土样放进烧杯, 静置 12 h 以后, 过滤上清液, 利用原子吸收光谱 (HITACHI Z 8100) 测定滤

液中 Ca^{2+} 浓度。C、D、E 处理的操作和 B 相同, 但是 HCl 的浓度分别为 0.3 mol L^{-1} 、 0.5 mol L^{-1} 、 1.0 mol L^{-1} 。本实验采用水中湿筛法 (Yoder 法) 分别对 A、B、C、D、E 处理的样品进行团粒分析实验^[12]。测定各个处理的粒径 > 2.0、2.0~ 1.0、1.0~ 0.5、0.5~ 0.25、0.25~ 0.1 mm 的各部分重量。湿筛实验结束后的水桶静置 24 h 后用吸管抽取上清液, 残留部分悬浊液转移到 1 000 ml 的量筒并定容到 1 000 ml。利用比重计法^[9] 测定 0.1 mm 以下的团粒部分。

此外, 分别采集 A、B、E 处理的粒径 2.0~ 1.0、1.0~ 0.5、0.5~ 0.25、0.25~ 0.1 mm 的团粒, 部分用来测定团粒中碳酸钙含量, 部分用于电子扫描显微镜观察实验。

团粒分析实验结果用均重直径 (MWD) 表示。均重直径是不考虑团粒粒径大小而从总体上表示团粒数量多少的指标。团粒的均重直径越大, 说明团粒越多。从团粒分析实验测得的均重直径中减去粒径分析实验测得的单粒 (砂粒、粉粒、粘粒) 均重直径, 即为土壤中团粒的均重直径 (mm)。均重直径计算公式如下^[13]:

$$\text{MWD} = (4 \sim 2 \text{ mm 团粒百分率}) \times (4 + 2) \div 2 + (2 \sim 1 \text{ mm 团粒百分率}) \times (2 + 1) \div 2 + \dots + (0.01 \text{ mm 以下的团粒百分率}) \times (0.01 + 0) \div 2$$

1.3.3 团粒表面和团粒断面碳酸钙分布测定

(1) 团粒表面碳酸钙分布测定。利用分析扫描电子显微镜 (JSM 5500) 对 A、B、E 处理的粒径 2.0~ 1.0、1.0~ 0.5、0.5~ 0.25、0.25~ 0.1 mm 的团粒进行观察, 并用元素 Mapping 对团粒表面碳酸钙的分布进行测定。(2) 团粒断面碳酸钙分布测定。团粒薄片制作方法如下: a. 将 50 ml 聚酯树脂加入容器中, 添加 5 ml 固化剂, 充分搅拌后静置至透明。b. 在内径 1 cm、高 1 cm 的丙烯管下端贴上滤纸, 然后分别加入 A、B、E 处理的 2.0~ 1.0 mm 团粒。c. 用注射器往丙烯管中加入树脂混合液, 使团粒被树脂充分浸泡。在 60℃ 条件下加热 8 h, 使之固定。d. 选取树脂固定好的试材适当部位, 用小型万能切断机 (MC-120) 切取 2 mm 薄片。利用 SEM/EDX 对薄片进行团粒断面一般观察和碳酸钙分布测定 (元素 Mapping)。

1.3.4 团粒中碳酸钙的含量测定 用重量测定法^[14] 测定各粒级团粒中碳酸钙的含量。

1.3.5 团粒和单粒组成元素测定 应用 EDX 对上述实验方法采集的单粒 (粗砂、细砂、粉粒和粘粒) 和团粒 (表面和断面) 进行组成元素分析。

2 结果与讨论

2.1 团粒均重直径

团粒分析实验结果如图 1 所示。自然黄土的团粒数量相对较少,蒸馏水处理样品的团粒均重直径约为 0.1 mm。施加不同浓度的 HCl 处理后,团粒均重直径的大小发生很大变化。不同处理的团粒的均重直径依 A、B、C、D、E 处理的顺序减少。与水饱和处理相比,施加 HCl 的 B、C、D、E 处理的团粒均重直径分别减少了 65.7%、82.7%、83.9%、99.0%。即随着 HCl 使用量的增多团粒的破坏程度增大,1.0 mol L⁻¹HCl 处理后的样品中团粒残留量仅约为水饱和处理的 1%。

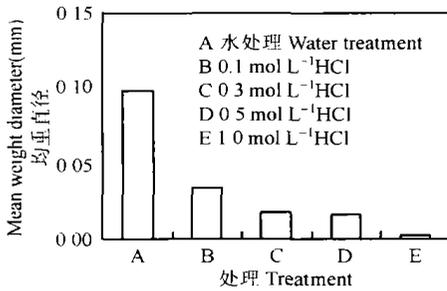


图 1 不同试验处理的黄土团粒均重直径

Fig. 1 Mean weight diameters of loess aggregates in different experimental treatments

2.2 不同处理的碳酸钙溶解量

因为碳酸钙是难溶性盐,相对于 HCl 处理而言,水饱和处理的碳酸钙溶解量极少。在此仅对不同浓度 HCl 处理的样品中碳酸钙溶解量进行探讨。由图 2 可知,施加 HCl 处理后的碳酸钙溶解量按 B、C、D、E 的顺序增加。即随着 HCl 使用量的增多,土壤中碳酸钙溶解量增加。

2.3 团粒中碳酸钙的含量

团粒分析试验采集到的 4 个粒级团粒中碳

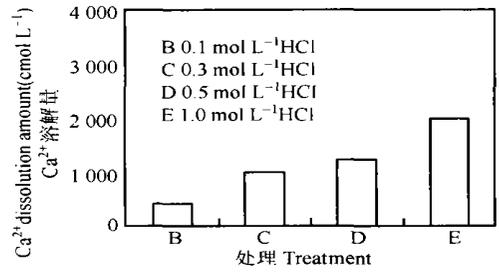


图 2 不同试验处理黄土的 Ca²⁺ 溶解量

Fig. 2 Ca²⁺ dissolution amounts of loess in different experimental treatments

钙的含量测定结果如图 3 所示。粒级 2.0~ 1.0 mm 的团粒中碳酸钙的含量为 283.2 g kg⁻¹,略高于土壤中碳酸钙含量,其余 3 个粒级团粒中碳酸钙均低于土壤中的含量。在所测的 4 个粒级团粒中,碳酸钙的含量随团粒粒级的减小呈减少的趋势。反之,团粒越大,其碳酸钙含量越高。

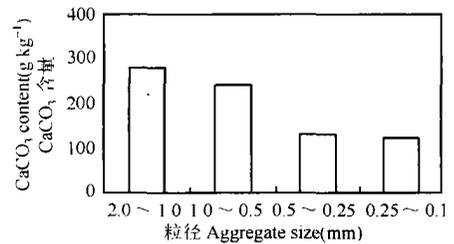


图 3 不同粒级团粒中 CaCO₃ 含量

Fig. 3 CaCO₃ amounts of aggregates of different size

2.4 团粒表面及内部化学物质组成

团粒表面及其内部、团粒组成基本颗粒—单粒(粗砂、细砂、粉粒+粘粒混合体、粘粒)的物质组成化学元素,其结果如表 1 所示。砂粒(包括粗砂和细砂)由 Si、Al、O 元素组成,可以认为本实验所测的砂粒类似于石英、长石之类的土壤原生矿物。粉粒+粘粒混合体以及粘粒的组成元素相同,较砂粒多了 Fe、Mg、K,由此可以认为这二者是由原生矿物以及

表 1 团粒和单粒的化学元素组成

Table 1 Material components of single grains and aggregates of loess

单粒 Single-grain	Si	O	Al	Fe	Mg	K	Ca	C
砂(粗砂和细砂) Sand (coarse sand and fine sand)	○	○	○	×	×	×	×	×
粉粒和粘粒 Silt and clay	○	○	○	○	○	○	×	×
团粒表面 Aggregate surface	○	○	○	○	○	○	○	○
团粒内部 Aggregate inner	○	○	○	○	○	○	○	○

注 Note: ○—有 With, × —没有 Without

黏土矿物(次生矿物)的铝硅酸盐或者铁铝氧化物组成。团粒表面及其内部的物质组成元素是一致的,即二者均由 Si、Al、O、Fe、Ca、K、Mg、C 等化学元素组成。从团粒的组成元素来看,黄土中团粒可以被看做是由原生矿物、黏土矿物以及碳酸钙构成的集合体。

2.5 团粒表面的微形态及碳酸钙的分布

由于同一实验处理不同粒级团粒表面的微形态特征几乎相同,所以可用粒级 0.25~0.10 mm 的团粒观察结果为代表加以说明。A、B、E 处理的粒级 0.25~0.10 mm 团粒放大 300 倍的照片如图 4~图 6 (见图版 I) 所示。其中 a 为团粒的电子扫描显微镜照片, b 为用元素 Mapping 拍摄的该团粒表面 Ca 分布图片。

从图 4a 可以看出,水饱和处理的黄土团粒表面分布着很多直径约为 5~30 μm 大小的块状或者板状微团粒。这些微团粒轮廓清晰,彼此之间致密地交错重叠在团粒表面上。在微团粒之间可见少量孔隙,其绝大部分为细小颗粒充填而整体上变得平滑。微团粒表面附着的细小颗粒以及微团粒之间充填的细小颗粒可以看做是附着在团粒表面的粉粒和粘粒。B 处理团粒表面(图 5a)仍以板状或块状的微团粒为主。相对于水饱和处理的团粒平滑表面,施加 0.1 mol L⁻¹ HCl 处理后的团粒表面的微团粒重叠层次感减弱,小孔隙略多,其状似蒸馏水处理的团粒表面的微团粒被部分剥离。E 处理(图 6a)的团粒棱角突出,团粒表面平坦,孔隙很少,微团粒分布少,且大小几乎都在 10 μm 以下。微团粒表面的粉粒和粘粒几乎不可目视。由此我们可以认为,随施加 HCl 使用量的增加,原本凹凸不平的团粒表面逐渐变的平坦,附着在其表面的微团粒呈剥离状减少,团粒及微团粒表面的粉粒和粘粒逐渐减少。

根据王永焱等^[2]的报道,甘肃地区(含兰州)黄土中的石膏(CaSO₄·2H₂O)平均含量为 2.8 g kg⁻¹,兰州黄土碳酸钙的含量为 255.0 g kg⁻¹(本实验自然黄土碳酸钙测定值为 261.0 g kg⁻¹)。以此值推算,在兰州周围的黄土中 CaSO₄ 含量不足碳酸钙含量的 1%。此外,用 EDX 进行的物质组成测定结果中,上述的团粒表面化学物质中也未明显见有 S 的出现,因此我们可以认为,在兰州周围的黄土团粒中 Ca 几乎是以碳酸钙的形式存在的。鉴于此,在以下的讨论中以 Ca 表示碳酸钙。

从图 4b 可以看出,蒸馏水处理后的团粒表面不规则地分布着很多大小不同的 Ca。有的 Ca 块小于

1 μm ,有的 Ca 块大于 10 μm 。用元素 Mapping 测得的 Ca 数量的多少依白>红>黄>绿>蓝(黑色为本底颜色)的顺序减少。比较图 4a 和图 4b 可以看出,白色和红色分布以团粒表面最上部居多,而蓝色多分布于斜面。可能与团粒表面 Ca 分布不均匀有关,也可能因团粒表面凹凸不平,元素 Mapping 的 X-射线只测定了斜面上分布的 Ca 的一部分。

和图 4b 相比,B 处理的团粒表面 Ca 的分布(图 5b)明显减少,但是仍局部存在少量直径大于 10 μm 的 Ca 块。相对 A 和 B 处理而言,E 处理团粒表面几乎很少见到直径大于 1 μm 的 Ca 块(图 6b)。从表示 Ca 分布的颜色来看,仅有桔黄和淡蓝 2 种颜色。这说明施加 1.0 mol L⁻¹ HCl 处理后的团粒表面 Ca 的残留极少。从团粒表面的形态特征以及碳酸钙的分布图像可知,随着 HCl 使用量的增多,团粒表面分布的碳酸钙逐渐减少,微团粒以及附着其表面的粉粒和粘粒逐渐减少。

2.6 团粒断面的微观形态特征及碳酸钙的分布

为了清晰地观察到每个独立的团粒断面形状,首先把团粒断面放大 50 倍进行观察。在此以 E 处理(图 7a,见图版 II)为例加以说明。团粒断面照片由黑色和灰白色组成,其中黑色为团粒部分,而灰白色为团粒固定时使用的树脂。在图 7a 中所显示的团粒轮廓清晰。在团粒内部可看到被树脂充填的发白部分,这些部位为团粒内部的孔隙。

土壤中的原生矿物的化学成分几乎都是 SiO₂ 或硅酸盐,黏土矿物则主要为 Si 四面体和 Al 八面体组成的结晶或非结晶态的硅酸盐以及游离态的硅铝氧化物。因此,可以认为 Si、O、Al 是土壤矿物中分布最多的元素。从本论文 2.4 的结果也可以看出, Si、O、Al 是构成土壤中团粒和单粒的最基本元素之一。由于树脂中含有 O,在树脂固定样品的团粒和间隙中有 O 大量分布,无法区分其来源于土壤还是树脂。因此我们决定用 Si、Al 来表示团粒断面的土粒子分布形态,用 Ca 表示碳酸钙。这样就可以通过比较团粒内部的 Si、Al、Ca 的分布来讨论团粒内部碳酸钙的有无及其分布形态。

E 处理的团粒断面中 Si、Al、Ca 的分布如图 7 的 b、c、d 所示。Si、Al 主要分布在图 7a 所显示黑色团粒部分,二者的轮廓与团粒分布十分吻合。这也说明以其表示土粒子分布是合理的。Ca 分布轮廓不如 Si、Al 清晰,在图 7a 所示团粒部位呈不规则分布。另外,比较图 7a 和图 7 的 b、c、d 可以看到在团粒间树脂充填部位也有极少量的 Si、Al、Ca 的不连

续分布,估计可能与树脂浸泡团粒时造成少量团粒溶解有关。

E处理团粒断面的Si、Al、Ca重复分布如图7e所示。由图7e可以看出,在各个团粒断面Si、Al、Ca呈同样分布规律,即以Si、Al分布为主体的间隙中有大量Ca的分布。这说明在E处理粒级2.0~1.0 mm的团粒断面明显有碳酸钙的分布。A、B处理的团粒断面Si、Al、Ca分布与E处理基本一致,在此略去其照片。尽管施加HCl处理对团粒均重直径及其表面碳酸钙的分布有很大影响,但是对残留团粒内部的Si、Al、Ca分布并未见有很大差异,故在此以E处理的结果为代表做如上论述。

为了进一步观察团粒断面碳酸钙的分布,选择A、B、E处理的团粒断面的一部分扩大300倍进行观察,各处理的Si、Al、Ca重复分布分别如图8(见图版II)的a、b、c所示。从整体来看,尽管图8的a、b、c所显示的团粒断面Si、Al、Ca的分布部位不同,但是三者的分布接触方式基本相同,大致可分为4种类型。即(1)Si—Al分布区,(2)Si—Al—Ca分布区,(3)Ca—Si—Al分布区,(4)Ca分布区。根据土壤中原生矿物和粘土矿物的组成元素特点,可以认为(1)Si—Al分布区:矿物颗粒;(2)Si—Al—Ca分布区:矿物颗粒表面覆盖着Ca;(3)Ca—Si—Al分布区:在碳酸钙表面附着矿物颗粒;(4)Ca分布区:Ca分布在矿物颗粒之间。根据上述Si—Al—Ca的分布形态,我们认为,无论是在矿物颗粒表面、矿物颗粒之间分布碳酸钙,还是碳酸钙的表面附着矿物颗粒,后三者都可以理解为碳酸钙在起到胶结物的作用。上述实验结果与王永焱等^[2]提出的“在兰州地区的黄土中,有的碳酸钙呈薄膜状粘附在矿物颗粒表面,有的聚集在矿物颗粒接触处起胶结作用”这一论述基本一致,此外还发现碳酸钙表面附着矿物颗粒这一存在形式。另外,团粒是由众多小团粒或微团粒组成,从碳酸钙与原生矿物、黏土矿物的关系考虑,团粒内部众多小团粒所表现出来的团粒类型,与王永焱和张宗祜^[7]、张宗祜^[3]提出的“镶嵌型、附着型、基底型、角砾型”相一致。

2.7 黄土的团粒和胶结物碳酸钙

刘东生等^[1]认为,在黄土堆积过程中,在弱碱性介质的氧化环境中,粉尘堆积物在雨水、霜雪、生物活动等作用下发生次生碳酸盐化,次生碳酸盐与粉尘中粘粒物质结合成微团聚体。从本研究结果来看,在黄土团粒形成过程中,碳酸钙的胶结作用是十分显著的。其理由有以下几点:

(1)从团粒分析实验结果来看,施加 1.0 mol L^{-1} HCl处理的样品的团粒均重直径与水饱和处理相比,减少了大约99%。这说明在本实验调查的黄土地区自然黄土中,随着胶结物碳酸钙的损失,大约99%的团粒被破坏。

(2)从不同浓度HCl处理的均重直径与 Ca^{2+} 溶解量关系(图9)来看,不同处理样品的滤液中的 Ca^{2+} 溶解量与该处理的均重直径之间存在反比的关系,呈对数减少。即HCl使用量越多,从黄土中溶解出的 Ca^{2+} 越多,团粒的均重直径越少。

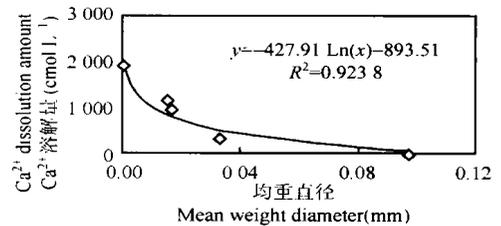


图9 黄土团粒的均重直径与 CaCO_3 溶解量的关系

Fig 9 Relation between mean weight diameter of aggregates and CaCO_3 dissolution amount

(3)从图4a, 5a, 6a来看,蒸馏水处理的样品团粒表面由很多微团粒组成,在微团粒表面附着很多粉粒和黏粒。低浓度HCl处理样品表面的微团粒呈剥离状减少,微团粒的层次分布减弱。高浓度的HCl处理后的样品,其团粒表面的微团粒数量和大小均大幅度减少,而且附着在微团粒上的粉粒和粘粒几乎不可目视。根据不同处理的团粒表面的上述微形态变化,同时比较图4b, 5b, 6b的Ca的分布,可以认为,随着HCl使用量的增多,团粒表面的碳酸钙减少,因而由其胶结而附着在团粒表面微团粒以及粉粒和粘粒减少。

(4)根据团粒分析实验结果,施加 1.0 mol L^{-1} HCl处理后2.0~1.0 mm粒级团粒百分率不足0.1%,所剩极少量的团粒表面碳酸钙的分布很少,从团粒断面观察结果来看,其团粒内部的Si、Al、Ca的分布形态与水饱和处理、 0.1 mol L^{-1} HCl处理的团粒内部并无差异。由此可以认为,尽管施加 1.0 mol L^{-1} HCl处理所剩团粒很少,但是正是因为该处理所剩团粒内部碳酸钙的存在,残留剩余的极少量大团粒才能保持稳定的团粒结构,仍以团粒的形式存在。

(5)根据团粒分析实验结果以及团粒表面、团粒断面的碳酸钙的分布,可以认为由于黄土团粒内

部存在碳酸钙的胶结作用, 矿物颗粒才被胶结而以团粒形式存在, 同时因为团粒表面有碳酸钙的分布, 才能将其周围的单粒或团粒胶结成更大的团粒。也就是说, 在黄土团粒表面和内部碳酸钙都发挥着重要的胶结作用。

(6) 在本实验的供试黄土中, 团粒中碳酸钙含量随粒级的增大而增多。这是因为团粒形成之初单粒由碳酸钙胶结而成微团粒, 而微团粒经过碳酸钙的进一步胶结为团粒, 大团粒是由很多小团粒或微团粒经碳酸钙胶结而成。也正是因为如此, 大团粒中的碳酸钙含量高。

作为土壤中团粒的胶结物, 黄土和其它土壤一样, 有机物也参与团粒的形成。Osipov 等^[15]曾报道在黄土团粒中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 也有胶结作用。通过本实验研究结果, 我们认为黄土团粒的胶结物主要是碳酸钙, 因此本论文主要围绕黄土团粒和胶结物碳酸钙的关系进行讨论。今后要开展包括碳酸钙、有机物以及 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 在内的多因素的胶结作用方面的研究。另外, 本实验用元素 Mapping 定性地研究了团粒表面和其内部碳酸钙的分布, 今后也要开展相应方面的定量研究。

3 结 论

本论文通过团粒分析实验、电子扫描显微镜等方法 and 手段对我国黄土高原西北部的自然土壤中的团粒和碳酸钙含量分布等进行研究, 从正(碳酸钙在团粒表面和内部的分布)反(碳酸钙的溶解对团粒数量的影响)两方面就二者的关系进行探讨, 得到以下结论:

- 1) 黄土中的团粒是由原生矿物、粘土矿物以及碳酸钙构成的集合体。
- 2) 在本实验采集的黄土中随着胶结物碳酸钙的大量损失, 大约 99% 的团粒被破坏。
- 3) 随着黄土中碳酸钙淋溶量的增多, 其团粒大幅度减少。
- 4) 随着黄土中团粒粒级增大, 其碳酸钙的含量呈增加趋势。
- 5) 在黄土团粒表面分布着碳酸钙, 随着碳酸钙的减少, 团粒表面附着的微团粒、粉粒和粘粒也减少。
- 6) 在团粒内部, 碳酸钙与矿物颗粒之间主要存在 3 种胶结形式, 即碳酸钙覆盖在矿物颗粒表面、碳酸钙分布在矿物颗粒之间以及碳酸钙表面粘附着矿

物颗粒。

7) 通过以上实验结果, 本论文证明了黄土中团粒的主要胶结物是碳酸钙这一理论。

致 谢 本实验在电子扫描显微镜操作方面得到 SARTY TRADING 公司的田村和信先生的大力帮助, 在图像解析方面得到东京农工大学的铃木创三副教授的指导, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. Liu D S. Loess and Environment (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [2] 王永焱, 林在贯著. 中国黄土的结构特征及物理力学性质. 北京: 科学出版社, 1990. 127 ~ 129. Wang Y Y, Lin Z G. Structural Characterizes and Physically Dynamics Properties of Chinese Loess (In Chinese). Beijing: Science Press, 1990. 127 ~ 129
- [3] 张宗祜. 黄土湿陷变形过程中微结构变化特征及湿陷性评价. 国际交流地质学术论文集(6). 北京: 地质出版社, 1985. 67 ~ 78. Zhang Z H. Microstructural Properties and Collapsibility Evaluation during Collapse Deformation of Loess (In Chinese). Geographical Paper Volume of International Exchange (6). Beijing: Geography Press, 1985. 67 ~ 78
- [4] 刘东生. 黄土的物质成分和结构. 北京: 科学出版社, 1966. Liu D S. Material Components and Structure of Loess (In Chinese). Beijing: Science Press, 1966
- [5] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性. 中国科学, 1980, 12: 1 203 ~ 1 208. Gao G R. Microstructural classification and collapsibility of Loess (In Chinese). Chinese Science, 1980, 12: 1 203 ~ 1 208
- [6] 王永焱, 藤志宏. 中国黄土的微结构及其在时代和区域上的变化. 科学通报, 1982, 27(2): 102 ~ 105. Wang Y Y, Teng Z H. Microstructure and its change during times and around regions of Chinese Loess (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1982, 27(2): 102 ~ 105
- [7] 王永焱, 张宗祜. 中国黄土. 西安: 山西人民美术出版社, 1982. Wang Y Y, Zhang Z H. Chinese Loess (In Chinese). Xian: Shanxi People Art Publish House, 1982
- [8] 仙北谷英贵, 富山禎仁, 久保内昌敏. ほか, 腐食環境下における切欠付き GFRP 丸棒の劣化に関する研究. 材料, 51(5): 512 ~ 517
- [9] 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会, 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 粒度試験 JIS A 1204. 東京: 新日本印刷株式会社, 2000. 69 ~ 87
- [10] 华孟, 王坚主编, 土壤物理学——附试验指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1993. 243 ~ 252. Hua M, Wang J. Soil Physics Attached to Experimental Instruction (In Chinese). Beijing: Peking Agricultural University Press, 1993. 243 ~ 252
- [11] 土壤標準分析・測定法委員会編. 土壤標準分析・測定法. 東京: 博友社, 1986. 14 ~ 23.
- [12] 土壤環境分析法編集委員会編, 土壤環境分析法. 東京: 博友社 1997. 40 ~ 43

- [13] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. Ed. *Methods of Soil Analysis, Part 1*. 2nd Ed. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin: Agron, Monogr., 9, 1986. 425~ 441
- [14] Soil Science Society of America and American of Agronomy. *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. SSSA, 1996. 456~ 457
- [15] Osipov V I, Sokolov V N. Factors and Mechanism of Loess Collapsibility. NATO ASI Series, 1994. 49~ 64

COMPOSITION OF LOESS AGGREGATE AND ITS RELATIONSHIP WITH CaCO_3 ON THE LOESS PLATEAU

Guo Yuwen^{1,2} Kato Makoto¹

(1 *United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan*)

(2 *Department of Environmental Science and Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Song Fei³

(3 *Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China*)

Zhang Yulong⁴

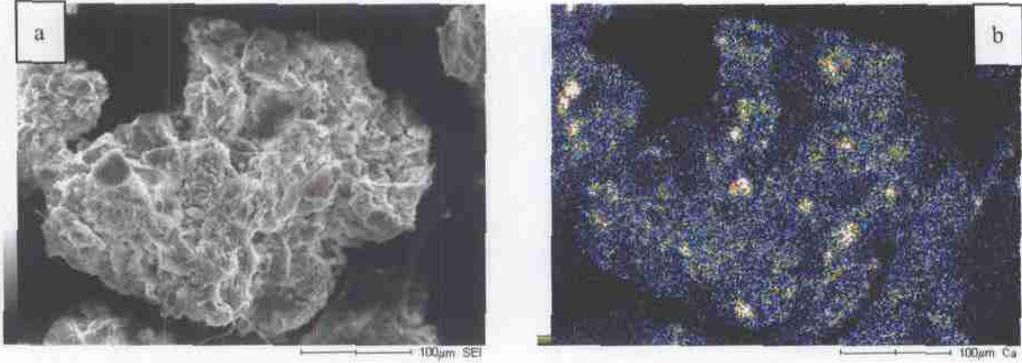
(4 *Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China*)

Zeng Siwei⁵ Wang Dekai⁵

(5 *Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract Natural loess in the northwest of the Loess Plateau was sampled, measured and studied for aggregate amount, relationship between the aggregates and CaCO_3 dissolution, composition of the aggregates, and CaCO_3 distribution on the surface and in the interior of the aggregates with aid of Scanning Electron Micrograph (SEM). The results show that: CaCO_3 takes part in the formation of almost all aggregates; the bigger the aggregates are, the higher the CaCO_3 amount is. whereas the number of aggregates is inversely proportional to CaCO_3 dissolution amount. With decrease in CaCO_3 distribution on aggregate surface, the amounts of microaggregates, silts and clay attaching to the aggregate surface reduce. Inside the aggregate, there are three types of cementation between CaCO_3 and mineral particles: CaCO_3 is adsorbed to mineral particle surface, CaCO_3 distributes among mineral particles and mineral particles attach to CaCO_3 surface. The experimental results testify that the main cement of loess aggregates is CaCO_3 .

Key words Loess; Aggregate; CaCO_3 ; Mineral particle; SEM/EDX

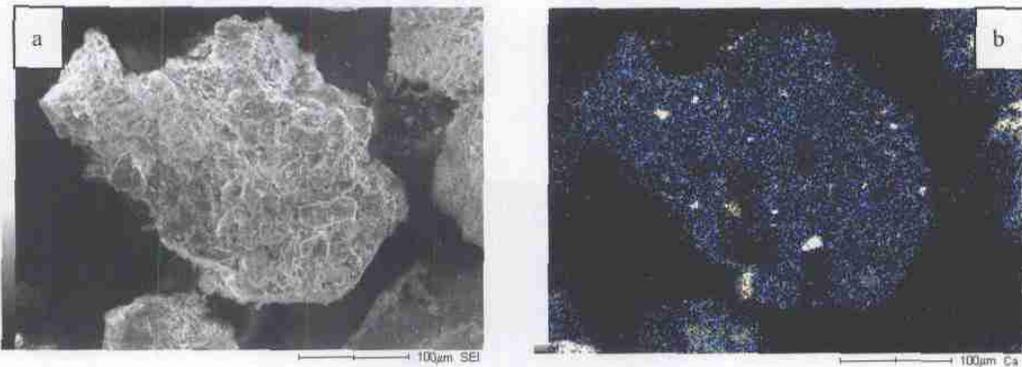


a. 电子扫描显微镜照片
a. Scanning electron micrograph

b. Ca 分布图片
b. Ca distribution

图 4 粒级 0.25~0.1mm 团粒表面 (水处理)

Fig. 4 Surface of aggregates of the particle size between 0.25~0.1mm (water treatment)

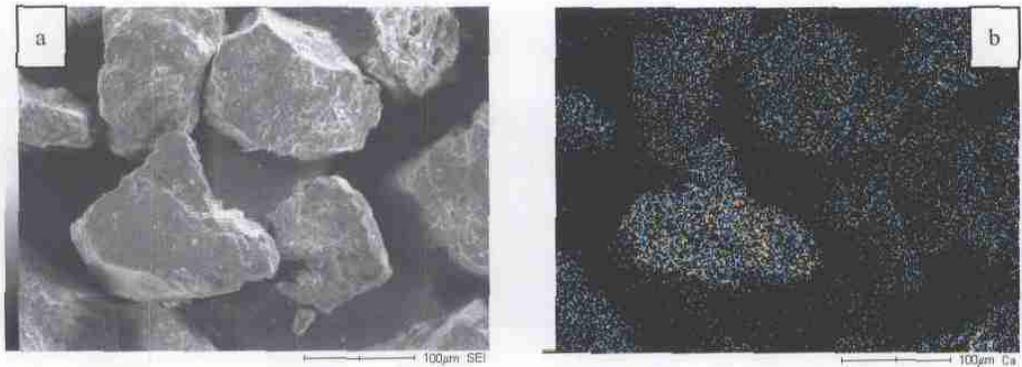


a. 电子扫描显微镜照片
a. Scanning electron micrograph

b. Ca 分布图片
b. Ca distribution

图 5 粒级 0.25~0.1mm 团粒表面 (0.1 mol L⁻¹ HCl 处理)

Fig. 5 Surface of aggregates of the particle size between 0.25~0.1mm (0.1 mol L⁻¹ HCl treatment)

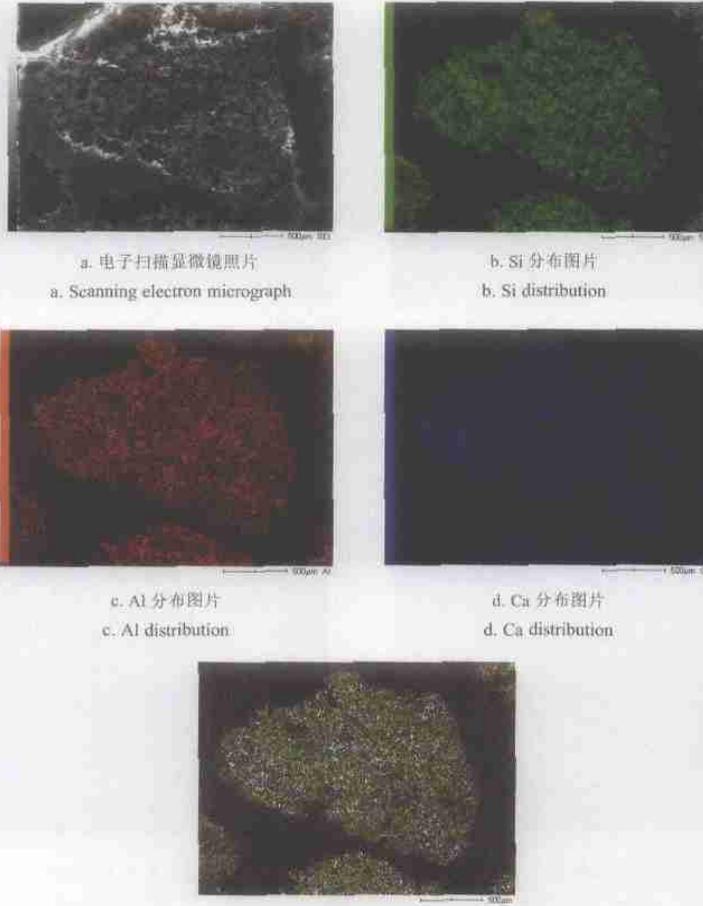


a. 电子扫描显微镜照片
a. Scanning electron micrograph

b. Ca 分布图片
b. Ca distribution

图 6 粒级 0.25~0.1mm 团粒表面 (1.0 mol L⁻¹ HCl 处理)

Fig. 6 Surface of aggregates of the particle size between 0.25~0.1mm (1.0 mol L⁻¹ HCl treatment)



a. 电子扫描显微镜照片
 a. Scanning electron micrograph

b. Si 分布图片
 b. Si distribution

c. Al 分布图片
 c. Al distribution

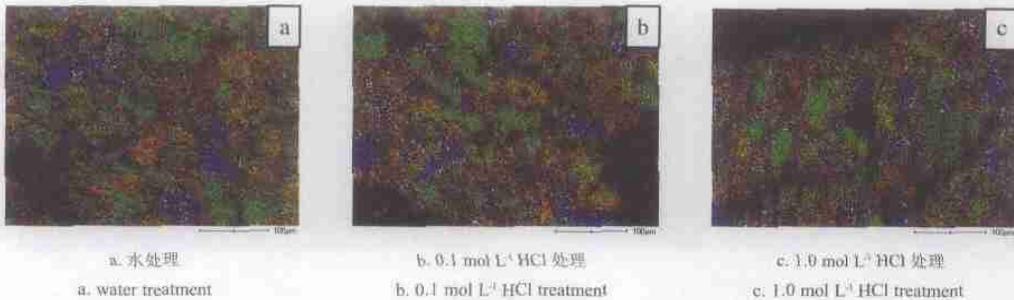
d. Ca 分布图片
 d. Ca distribution

e. Si, Al, Ca 重复分布图片 (Si- 绿, Al- 红, Ca- 蓝)

e. Si, Al, Ca overlapping distribution (Si-green, Al-red, Ca-blue)

图 7 粒级 2.0~1.0 mm 团粒断面 (1.0 mol L⁻¹ HCl 处理 50 倍放大)

Fig. 7 Scanning electron micrograph (magnified by 50 times) of the section of aggregates of the particle size between 2.0~1.0mm under 1.0 mol L⁻¹ HCl treatment)



a. 水处理
 a. water treatment

b. 0.1 mol L⁻¹ HCl 处理
 b. 0.1 mol L⁻¹ HCl treatment

c. 1.0 mol L⁻¹ HCl 处理
 c. 1.0 mol L⁻¹ HCl treatment

图 8 粒级 2.0~1.0 mm 团粒断面 Si、Al、Ca 重复分布图片 (300 倍放大) (Si- 绿, Al- 红, Ca- 蓝)

Fig. 8 Si, Al, Ca overlapping distribution (magnified by 300 times) on the section of aggregate of the particle size between 2.0~1.0mm under 1.0 mol L⁻¹ HCl treatment) (Si-green, Al-red, Ca-blue)