广东省赤红壤区土壤团聚体有机碳和铁氧化物特征及稳定性

唐 贤，黄伟濠，卢 瑛，李 博，王 超，董玉清

（华南农业大学资源环境学院，广州 510642）

摘要： 通过野外采样和室内分析相结合，以广东省赤红壤区花岗岩(G)、第四纪红土(Q)和砂页岩(S)母质发育的林地(FL)、水田(PF)和旱地(UL)土壤为研究对象，分析了土壤团聚体有机碳及其组分和不同形态铁氧化物含量，探究了其对土壤团聚体稳定性的影响及贡献。结果显示：(1)3 种母质发育的 3 种利用方式土壤团聚体均以>0.25 mm 为主，2～5 mm 团聚体以花岗岩母质发育林地土壤最高(58.51%)，0.25～2 mm 团聚体以花岗岩(62.93%)和第四纪红土(59.21%)母质发育水田和旱地土壤最高；土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)以砂页岩母质发育林地土壤最高；(2)3 种母质发育林地土壤团聚体有机碳及其组分主要分布在 2～5 mm 粒径中，水田和旱地土壤团聚体有机碳及其组分主要分布在<0.053 mm 粒径中；3 种母质发育林地土壤团聚体铁氧化物含量主要分布在<0.053，0.25～2 mm 粒径中，水田和旱地土壤团聚体铁氧化物含量主要分布在<0.053 mm 粒径中。(3)相关分析和主成分分析表明，MWD、GMD 与团聚体 HAC、HAC/FAC、Fe_{fr} 和 Fe_{co} 呈显著相关($P<0.05$)；不同母质和利用方式以砂页岩母质发育的林地土壤团聚体胶结能力最好。研究表明，不同母质和利用方式土壤团聚体 HAC、HAC/FAC、Fe_{fr} 和 Fe_{co} 含量分布差异显著，进而影响了土壤团聚体分布和稳定性，同时砂页岩母质发育的林地土壤团聚体结构较稳定。

关键词： 土壤团聚体；铁氧化物形态；有机碳组分；利用方式；成土母质

中图分类号：S151.9；S152.4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1009-2242(2021)02-0200-10

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.027

Characteristics and Stability of Organic Carbon and Ferric Oxidein in Soil Aggregates and Aggregate Stability in Lateritic Red Soil Region, Guangdong Province

TANG Xian, HUANG Weihao, LU Ying, LI Bo, WANG Chao, DONG Yuqing

(*College of Natural Resources and Environment*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642)

Abstract: Soils derived from granite (G), quaternary red earth (Q), and sand shale (S) with forestland (FL), paddy field (PF), and upland (UL) were collected in Guangdong lateritic red soil region. The content of ferric oxide, organic carbon and its fractions in soil aggregate were analyzed, and the differences of soil aggregate stability and the factors affecting the aggregate stability were explored. The results showed that: (1) Aggregates larger than 0.25 mm in soil dominated under three land use types with three parent materials; 2～5 mm aggregates was the highest (58.51%) in forestland soil derived from granite; 0.25～2 mm aggregates was the highest in paddy field and upland soils derived from granite (62.93%) and quaternary laterite (59.21%). Geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) of soil aggregates were highest in forestland with sand shale parent materials. (2) The soil organic carbon (SOC) and component content in forest land soil were mainly distributed in 2～5 mm aggregates derived from three parent materials, and that in paddy and upland soils were mainly distributed in <0.053 mm aggregates. The ferric oxide form content in forestland soil were mainly distributed in <0.053 and 0.25～2 mm aggregates derived from three parent materials, and that in paddy and upland soils were mainly distributed in <0.053 mm aggregate. (3) Correlation analysis and principal component analysis showed that the MWD and GMD had significant correlations with HAC, HAC/FAC, Fe_{fr}, and Fe_{co}. Forestland soil aggregates derived from sand shale

收稿日期：2020-10-06
资助项目：NSFC-广东省联合基金集成项目(U1901601)
第一作者：唐贤(1992—)，男，在读博士研究生，主要从事水土保持生态修复与环境保护研究。E-mail：18910711250@163.com
通信作者：卢瑛(1966—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事土壤发生与分类、耕地质量提升、土壤重金属污染控制与修复研究。E-mail：luying@scau.edu.cn

parent materials had the best cementing ability among different land use types and parent materials. The results showed that the influence of parent materials and utilization modes on the stability of aggregates was significant, mainly due to the differences of HAC, HAC/FAC, Fe_{fr}, and Fe_{co}. At the same time, forestland soil aggregates with sand shale parent materials had higher structural stability.

Keywords: soil aggregate; ferric oxide form; organic carbon component; utilization mode; soil parent material

土壤团聚体是土壤结构的基本单元，影响土壤众多物理、化学和生物性质，其组成和稳定性是衡量土壤肥力高低和评价土壤质量的重要指标[1]。在土壤团聚体的形成、稳定及破坏方面，有机碳和铁氧化物作为团聚体形成的重要胶结物质，其组分和形态均随团聚体变化而变化，增加土壤有机碳和铁氧化物含量能有效提高土壤的团聚能力[2]。因此，明确土壤团聚体有机碳和铁氧化物的分布特征及其与团聚体稳定性的关系，对理解土壤团聚体稳定机制、弄清团聚体稳定性影响因素、改善土壤团聚体稳定性具有重要意义。

有研究[3]表明，不同母质及利用方式对土壤团聚体分布和稳定性有显著影响。陈山等[4]研究表明，不同土地利用方式对团聚体稳定性有极大影响，水田和林地土壤团聚体稳定性较高，土壤有机质的保持较好，旱地和果园土壤团聚体的稳定性大幅度降低；谷忠元等[5]研究发现，成土母质通过影响土壤质地、有机质、铁氧化物含量等，间接影响湘东地区土壤团聚体的稳定。同时，土壤团聚体的结构组成和稳定性同时受到有机、无机及有机无机复合体等胶结物质的影响[6-7]，如有机碳、铁氧化物等，这些胶结物质往往因为成土母质和利用方式的不同，其含量和分布产生差异[8]。铁氧化物和有机质通常被认为是团聚作用中重要的物质，常常吸附在黏粒表面[9]。Peng 等[6]研究发现，对于南方老成土，在微团聚体中铁氧化物为主要稳定物质，而在大团聚体中有机质对其稳定性影响更大。

广东省赤红壤区地处亚热带雨林气候区，高温多雨，湿、热同步，化学风化、淋溶作用强烈，脱硅富铁铝化明显，相对于其他地区，有机碳组分和铁氧化物含量差异明显，其对团聚体形成和稳定作用也更加明显。研究者[10-11]分别单独从母质或利用方式研究团聚体稳定性，而对母质和利用方式双重因素下团聚体分布及稳定性研究较为缺乏，尤其对不同粒径团聚体胶结物质（有机碳和铁氧化物）分布及其与团聚体稳定性的关系研究更为鲜见。因此，本文以花岗岩（G）、第四纪红土（Q）和砂页岩（S）母质发育的林地（FL）、水田（PF）和旱地（UL）土壤为对象，研究土壤不同粒径团聚体有机碳组分和铁氧化物形态的分布特征及其与团聚体水稳定性的关系，籍以揭示赤红壤区土壤团聚体形成规律，为提升团聚体稳定性和改善土壤结构提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　样品采集

本研究于 2019 年 7 月 10—13 日在广东省赤红壤区佛冈、英德和从化选取由花岗岩（G）、第四纪红土（Q）和砂页岩（S）母质发育的林地（FL）、水田（PF）和旱地（UL）表层土壤（0—20 cm），采集样品在室内风干后，进行四分的土样过 2 mm 筛，再进行四分过 0.25 mm 筛，用同样的方法处理得到过 0.15 mm 筛的土样，保存供测定各项土壤指标。采样点具体信息见表 1。

表 1　土壤采样点基本信息

编号	成土母质	土地利用方式	采样地点	经度	纬度	土壤类型
H－1	花岗岩（G）	林地（FL）	佛冈县石角镇东二村	113°30′45″	23°53′56″	赤红壤
H－2		水田（PF）	佛冈县汤塘镇高滩村	113°27′37″	23°45′12″	水稻土
H－3		旱地（UL）	佛冈县汤塘镇高滩村	113°27′29″	23°45′24″	赤红壤
Q－1	第四纪红土（Q）	林地（FL）	英德市英红镇坑口咀	113°24′14″	24°16′55″	赤红壤
Q－2		水田（PF）	英德市英红镇共耕村	113°24′49″	24°19′34″	水稻土
Q－3		旱地（UL）	英德市英红镇坑口咀	113°24′12″	24°16′58″	赤红壤
S－1	砂页岩（S）	林地（FL）	从化区梦鱼里	113°36′27″	23°29′13″	赤红壤
S－2		水田（PF）	从化区梦鱼里	113°36′29″	23°29′17″	水稻土
S－3		旱地（UL）	从化区梦鱼里	113°36′28″	23°29′17″	赤红壤

1.2　测定方法

土壤 pH 采用电位法（水土比 2.5∶1）测定；颗粒组成采用吸管法测定（根据美国土壤质地分类制，黏粒，<0.002 mm；粉粒，0.002～0.05 mm；砂粒，0.05～2 mm）；容重采用环刀法测定；全氮采用硫酸消化—半微量凯氏蒸馏法测定；全磷采用酸溶—钼锑抗比色法测定[12]。土壤样品基本理化性质见表 2。

水稳性团聚体采用 Elliott 湿筛法[13]，并略作修改：将风干的原状土四分后一部分保存，另一部分分别过 5，2 mm 筛，弃去<2 mm 的土样，混匀后称取

50.0 g 土样(粒径在 2～5 mm),将其放置在由孔径分别为 2,0.25,0.053 mm 组成的自动振荡套筛的最上层,在室温条件下用蒸馏水浸润 1 h 后,以频率 25 次/min 和上下振幅 5 cm,筛 2 min。筛分结束后,将每层筛上的团聚体冲洗至已称重 100 mL 离心管中,分别得到>2,2～0.25 mm 大团聚体,0.25～0.053 mm 微团聚体和<0.053 mm 粉黏粒。将离心管离心弃去上清液,于烘箱中 55 ℃烘干至恒重,再将离心管置于室温下 24 h 后称重。

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾—硫酸消化法测定;腐殖酸总碳(HUAC)采用焦磷酸钠—氢氧化钠提取,重铬酸钾—硫酸消化法测定;胡敏酸碳(HAC)采用焦磷酸钠—氢氧化钠提取,重铬酸钾—硫酸消化法测定;富里酸碳(FAC)利用差减法[12]获得(FAC=HUAC－HAC)。

络合态铁(Fe_{co})采用焦磷酸钠浸提—原子吸收光谱法测定;游离态铁(Fe_{fr})采用柠檬酸钠—连二亚硫酸钠—碳酸氢钠浸提,邻菲罗啉比色法测定;非晶质态铁(Fe_{un})采用草酸铵浸提,邻菲罗啉比色法测定[14];晶质态铁(Fe_{cr})利用差减法[14]计算($Fe_{cr}=Fe_{fr}-Fe_{un}$)。

1.3 数据处理

土壤团聚体水稳定性用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)表征,计算公式为[14]:

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i w_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{1}$$

$$GMD=\exp\frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{2}$$

式中:在 4 个粒级中($i=1$～4),x_i 为每个粒级下的团聚体平均直径(mm);w_i 为每个粒级下对应于 x_i 的团聚体质量百分比(%)。

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理和制表,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析、相关性分析和主成分分析,差异显著性水平($P<0.05$)通过邓肯法(Duncan 法)进行检验。采用 Origin 2018 软件进行制图。

表 2 土壤样品基本理化性质

编号	土壤 pH	全氮/($g\cdot kg^{-1}$)	全磷/($g\cdot kg^{-1}$)	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	土壤颗粒组成/%		
					砂砾	粉粒	黏粒
H－1	4.20±0.04Bc	0.96±0.03Cb	0.13±0Cc	1.25±0.08Aa	54.59±1.03Ac	20.09±0.33Cb	25.32±1.36Ba
H－2	5.02±0.02Bb	1.05±0.01Ba	0.52±0Cb	1.27±0.18Aa	68.04±0.78Ba	20.56±0.45Bb	11.40±0.34Bc
H－3	5.40±0.03Aa	1.08±0Ba	0.65±0.01Ca	1.18±0.27Aa	60.16±0.68Bb	22.78±0.71Ba	17.06±0.03Cb
Q－1	6.26±0.05Aa	2.05±0.02Ba	0.87±0.01Aa	1.12±0.02Ac	5.30±0.56Cc	65.26±0.56Aa	29.44±0Aa
Q－2	5.52±0.01Ab	1.70±0Ab	0.69±0.01Bb	1.24±0.02Ab	31.41±1.20Cb	51.40±0.80Ab	17.20±0.40Ab
Q－3	4.84±0.02Cc	1.12±0.01Ac	0.88±0.02Ba	1.41±0.07Aa	61.69±0.11Ba	24.99±0Ac	13.32±0.11Ac
S－1	4.02±0.01Cc	2.28±0.01Aa	0.20±0Ba	0.85±0.09Bb	44.47±0.44Bc	23.87±0.35Ba	31.66±0.08Aa
S－2	5.06±0.04Ba	0.74±0Cc	1.31±0.02Aa	1.18±0.02Aa	74.27±0.30Aa	15.69±0.47Cc	10.04±0.17Cc
S－3	5.01±0.01Bb	0.95±0.02Cb	1.15±0.01Ab	1.31±0.10Aa	67.73±0.58Ab	17.97±0.50Cb	14.30±0.08Bb

注:不同大写字母表示同一利用方式不同母质间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一母质不同利用方式间差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体分布与稳定性特征

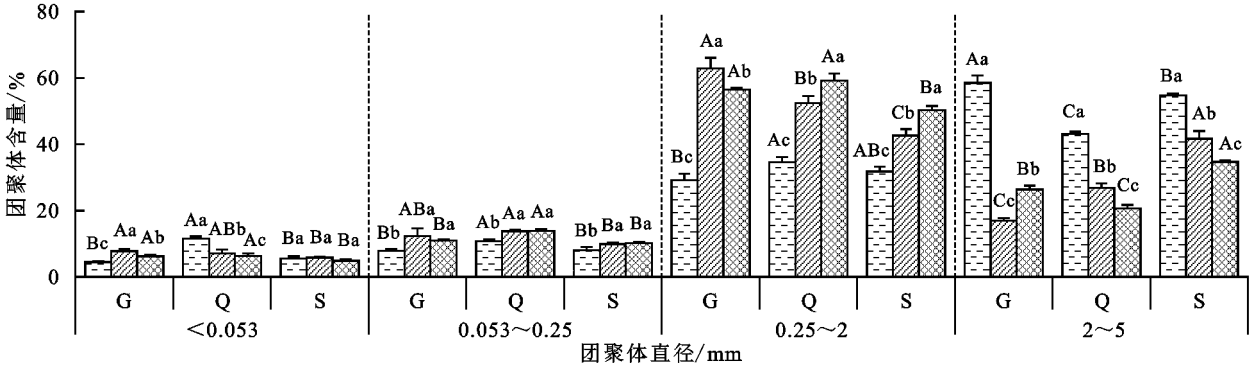
从图 1 可以看出,3 种母质和 3 种土地利用方式土壤均以>0.25 mm 团聚体为主。花岗岩母质发育土壤中,<0.053,0.053～0.25,0.25～2 mm 团聚体含量以水田显著高于旱地和林地($P<0.05$);第四纪红土母质发育土壤中,<0.053 mm 团聚体含量以林地最高(11.50%),0.053～0.25 mm 团聚体含量以水田和旱地最高,分别为 13.77%和 13.88%($P<0.05$);砂页岩母质发育土壤中,0.053～0.25 mm 团聚体含量以水田(9.86%)和旱地(10.13%)显著高于林地(8.02%),0.25～2 mm 团聚体含量以旱地(50.31%)显著高于水田(42.65%)和林地(31.79%)($P<0.05$)。3 种利用方式和 3 种母质发育土壤中 2～5 mm 团聚体含量均以林地(43.13%～58.51%)最高($P<0.05$)。

林地和旱地土壤<0.053,0.053～0.25,0.25～2 mm 团聚体含量以第四纪红土母质发育土壤显著高于花岗岩和砂页岩发育土壤,2～5 mm 团聚体含量以花岗岩母质发育土壤最高($P<0.05$);水稻土<0.053 mm 团聚体含量以花岗岩母质发育土壤最高,0.053～0.25 mm 团聚体含量以第四纪红土母质发育土壤最高,0.25～2 mm 团聚体含量在花岗岩母质发育土壤中最高,2～5 mm 团聚体含量在砂页岩母质发育土壤中最高($P<0.05$);旱地土壤<0.053 mm 团聚体含量以花岗岩和第四纪红土母质发育土壤最高,0.25～2 mm 团聚体含量以花岗岩母质发育土壤最高,2～5 mm 团聚体含量以砂页岩母质发育土壤最高($P<0.05$)。

从图 2 可以看出,土壤团聚体 GMD 和 MWD 在 3 种母质和 3 种利用方式下差异显著。花岗岩母质发育土壤团聚体 GMD 和 MWD 以林地>旱地>水田($P<0.05$);第四纪红土和砂页岩母质发育土壤团聚体 GMD

和 MWD 以林地＞水田＞旱地($P<0.05$)。

3 种母质发育林地土壤团聚体 GMD 和 MWD 以花岗岩＞砂页岩＞第四纪红土，水稻土团聚体 GMD 和 MWD 以砂页岩＞第四纪红土＞花岗岩，旱地土壤团聚体 GMD 和 MWD 以砂页岩＞花岗岩＞第四纪红土($P<0.05$)。



注：G 为花岗岩；Q 为第四纪红土；S 为砂页岩；图中不同大写字母表示同一利用方式不同母质差异显著($P<0.05$)；不同小写字母表示同一母质不同利用方式的差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1　不同母质和土地利用方式土壤团聚体分布

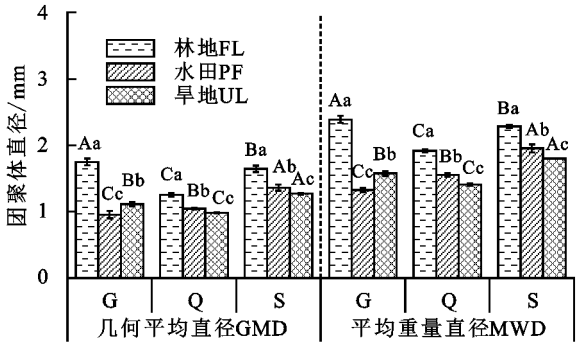


图 2　不同母质和土地利用方式下 MWD 和 GMD 分布

2.2　土壤团聚体有机碳及其组分特征

3 种母质发育林地土壤团聚体有机碳及其组分主要分布在 2～5 mm 粒径中，水田和旱地土壤有机碳及其组分主要分布在＜0.053 mm 粒径中；花岗岩和砂页岩母质发育的 3 种利用方式土壤团聚体有机碳及其组分主要分布在＜0.053 mm 粒径中，第四纪红土母质发育土壤团聚体有机碳及其组分主要分布在＜0.053，2～5 mm 粒径中(图 3)。

花岗岩母质发育土壤中，＜0.053，0.053～0.25，0.25～2，2～5 mm 团聚体 SOC、HUAC 和 FAC 含量以林地显著高于水田和旱地，HAC 含量以水田显著高于林地和旱地，＜0.053，0.053～0.25 mm 团聚体 HAC/FAC 含量为旱地＞水田＞林地，0.25～2，2～5 mm 团聚体 HAC/FAC 含量为水田＞旱地＞林地($P<0.05$)。第四纪红土母质发育土壤中，＜0.053 mm 团聚体 SOC、HUAC 含量为旱地＞水田＞林地，HAC 含量以旱地和水田显著高于林地，FAC 含量为旱地＞林地＞水田，HAC/FAC 含量为水田＞林地＞旱地；2～5 mm 团聚体 SOC、HUAC 和 FAC 含量为林地＞水田＞旱地，HAC 含量以林地显著高于水田和旱地，HAC/FAC 含量为旱地＞水田＞林地($P<0.05$)。砂页岩母质发育土壤中，＜0.053 mm 团聚体 SOC 含量以旱地显著高于水田和林地，HUAC、FAC 含量为旱地＞林地＞水田，HAC 含量为旱地＞水田＞林地，HAC/FAC 含量为水田＞旱地＞林地($P<0.05$)。

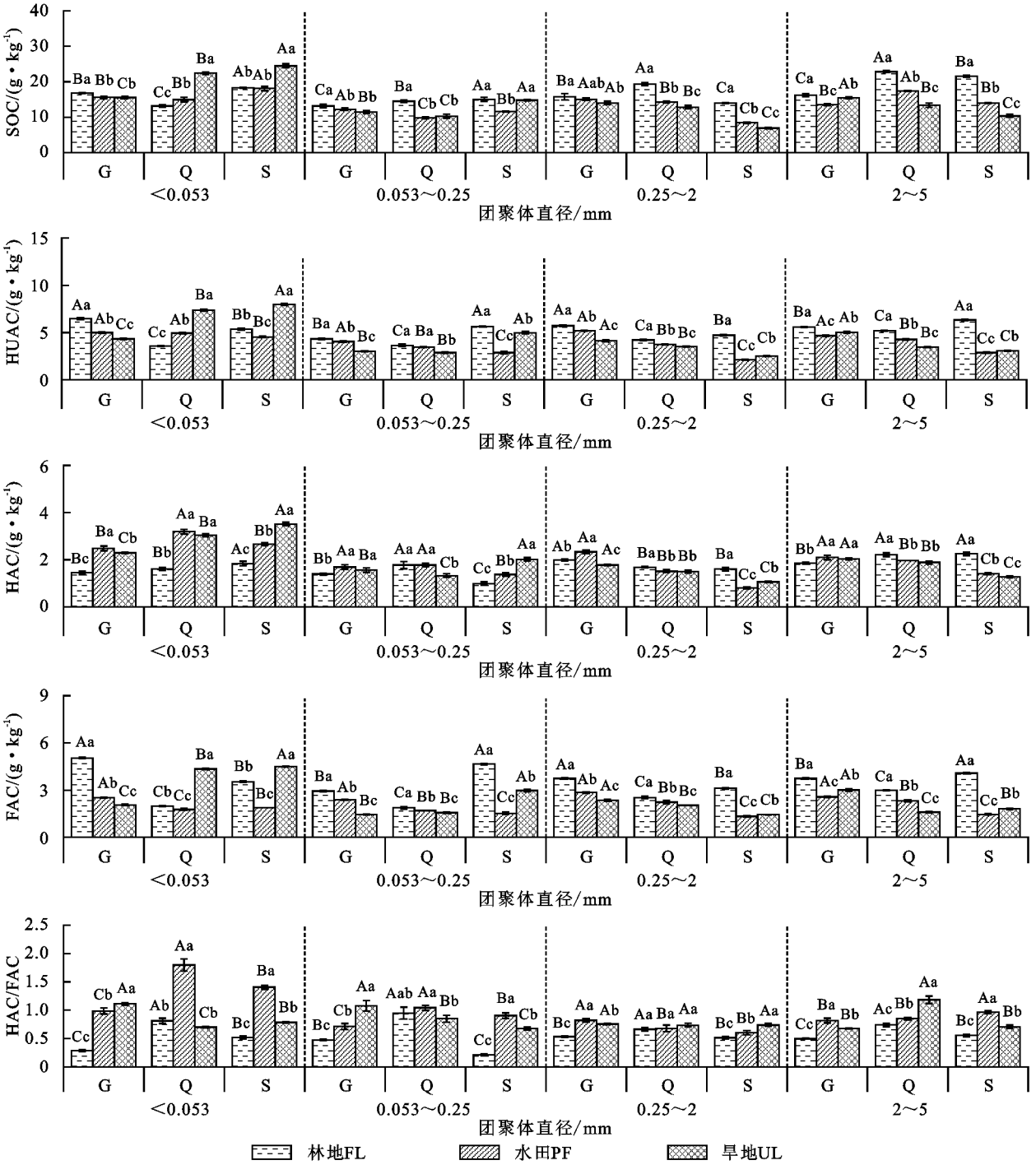
林地土壤 2～5 mm 团聚体 SOC、HAC/FAC 含量为第四纪红土＞砂页岩＞花岗岩，HUAC、FAC 含量为砂页岩＞花岗岩＞第四纪红土，HAC 含量为第四纪红土、砂页岩＞花岗岩($P<0.05$)；水稻土＜0.053 mm 团聚体 SOC 含量为砂页岩＞花岗岩、第四纪红土，HUAC 含量为花岗岩、第四纪红土＞砂页岩，HAC 含量为第四纪红土＞花岗岩、砂页岩，FAC 含量为花岗岩＞砂页岩＞第四纪红土，HAC/FAC 含量为第四纪红土＞砂页岩＞花岗岩($P<0.05$)；旱地土壤＜0.053 mm 团聚体 SOC、HUAC、HAC、FAC 含量为砂页岩＞第四纪红土＞花岗岩，HAC/FAC 含量为花岗岩＞砂页岩＞第四纪红土($P<0.05$)。

2.3　土壤团聚体不同形态铁氧化物特征

3 种母质发育林地土壤团聚体铁氧化物含量主要分布在＜0.053，0.25～2 mm 粒径中，水田和旱地土壤团聚体铁氧化物含量主要分布在＜0.053 mm 粒径中；花岗岩母质发育林地、水田和旱地土壤团聚体铁氧化物形态主要分布在＜0.053，0.25～2，2～5 mm 粒径，第四纪红土母质发育土壤中主要分布在＜0.053，0.25～2 mm 粒径，砂页岩母质发育土壤中主要分布在＜0.053 mm 粒径(图 4)。

花岗岩母质发育土壤中，＜0.053 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{cr} 含量以林地显著高于水田和旱地，Fe_{co}、Fe_{un} 含量为林地＞水田＞旱地($P<0.05$)；0.25～2 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{cr} 含量为林地＞旱地＞水田，Fe_{co} 含量为水田＞林地＞旱地，Fe_{un} 含量为林地＞水田＞旱地($P<0.05$)；2～5 mm 团聚体 Fe_{fr} 含量以旱地显著高于林地和水田，Fe_{co} 含量为水田＞旱地＞林地，Fe_{cr} 含

量为旱地>林地>水田，Fe_{un}含量为林地>水田>旱地($P<0.05$)。第四纪红土母质发育土壤中，<0.053 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{cr}含量为旱地>林地>水田，Fe_{co}含量为旱地>水田>林地，Fe_{un}含量为林地>旱地>水田($P<0.05$)；0.25～2 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{cr}含量为林地>旱地>水田，Fe_{co}含量以旱地显著高于林地和水田，Fe_{un}含量为林地>水田>旱地($P<0.05$)。砂页岩母质发育土壤中，<0.053 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{co}、Fe_{cr}含量均为林地>旱地>水田，Fe_{un}含量为旱地>水田>林地($P<0.05$)。

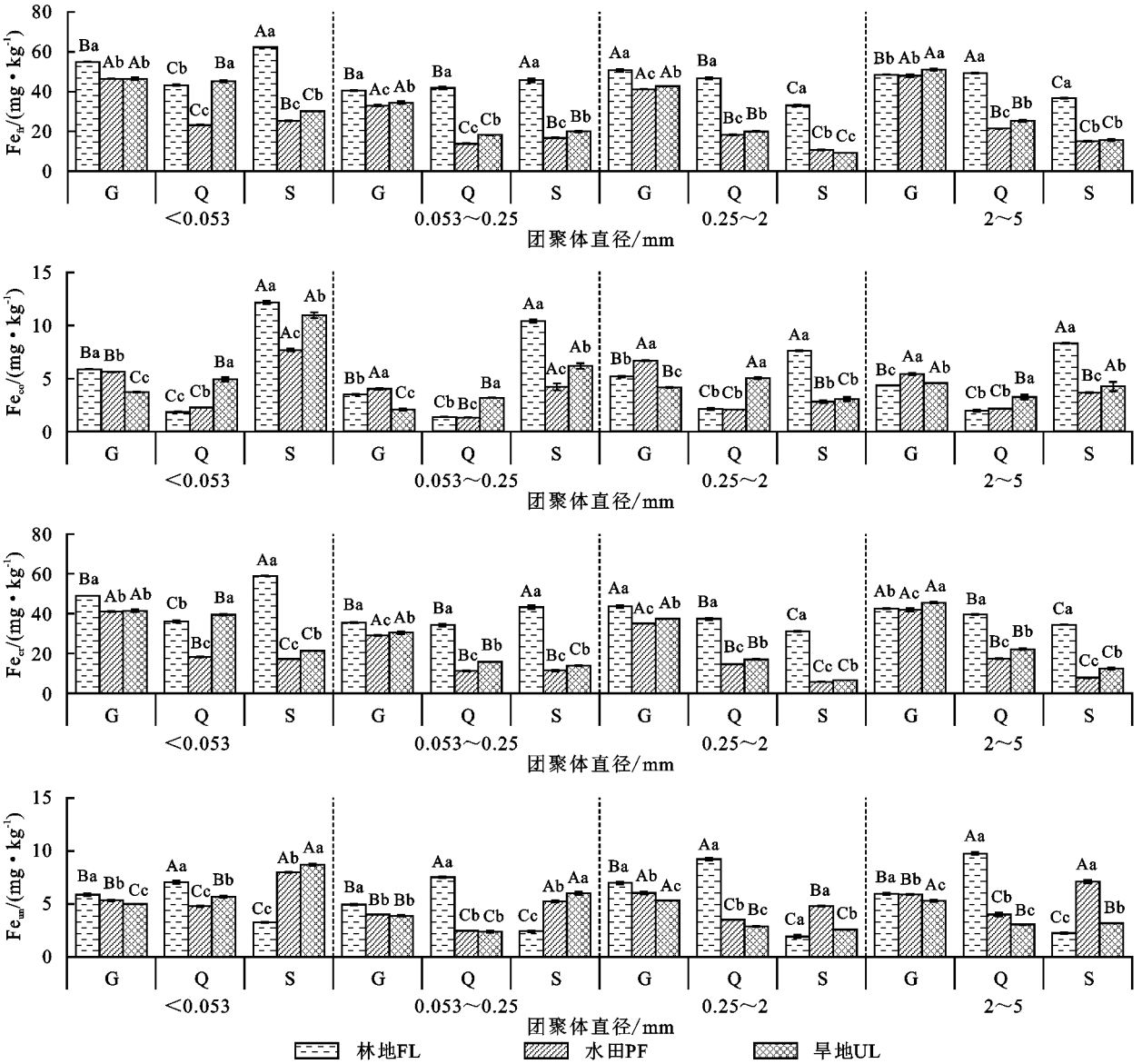


注：SOC 为土壤有机碳；HUAC 为腐殖酸总碳；HAC 为胡敏酸碳；FAC 为富里酸碳；HAC/FAC 为胡敏酸碳/富里酸碳。

图 3 不同母质和利用方式土壤团聚体有机碳及组分分布

林地土壤<0.053 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{co}、Fe_{cr}含量均为砂页岩>花岗岩>第四纪红土，Fe_{un}含量在不同母质发育土壤中为第四纪红土>花岗岩>砂页岩；0.25～2 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{cr}含量在不同母质发育土壤中均为花岗岩>第四纪红土>砂页岩，Fe_{co}含量在不同母质发育土壤中为砂页岩>花岗岩>第四纪红土，Fe_{un}含量在不同母质发育土壤中为第四纪红土>花岗岩>砂页岩($P<0.05$)。水稻土<0.053 mm 团聚体 Fe_{fr}含量在不同母质发育土壤中为花岗岩>砂页岩>第四纪红土，Fe_{co}含量在不同母质发育土壤中为砂页岩>花岗

岩>第四纪红土,Fe_{cr}含量在不同母质发育土壤中为花岗岩>第四纪红土>砂页岩,Fe_{un}含量在不同母质发育土壤中为砂页岩>花岗岩>第四纪红土($P<0.05$)。旱地土壤<0.053 mm 团聚体 Fe_{fr}、Fe_{cr}含量在不同母质发育土壤中为花岗岩>第四纪红土>砂页岩,Fe_{co}含量在不同母质发育土壤中为砂页岩>第四纪红土>花岗岩,Fe_{un}含量在不同母质发育土壤中为砂页岩>第四纪红土>花岗岩($P<0.05$)。



注:Fe_{fr}为游离态铁;Fe_{co}为络合态铁;Fe_{cr}为晶质态铁;Fe_{un}为非晶质态铁。

图 4　不同母质和利用方式土壤团聚体铁氧化物分布

2.4　土壤团聚体稳定性相关分析

土壤团聚体有机碳组分和铁氧化物与团聚体稳定性关系密切(表 3)。在<0.053 mm 团聚体中,MWD 和 GMD 与 Fe_{fr} 和 Fe_{co} 呈极显著正相关,与 HAC 和 HAC/FAC 呈极显著负相关($P<0.01$);在 0.053~0.25 mm 团聚体中,MWD 和 GMD 与 SOC、HUAC、FAC、Fe_{fr}、Fe_{co} 和 Fe_{cr} 呈极显著正相关($P<0.01$),与 HAC 和 HAC/FAC 呈显著负相关($P<0.05$);在 0.25~2 mm 团聚体中,MWD 和 GMD 与 FAC 呈显著正相关($P<0.05$),与 HAC/FAC 呈极显著负相关($P<0.01$),与铁氧化物形态相关性不显著($P>0.05$);在 2~5 mm 团聚体中,MWD 和 GMD 与 HUAC 和 FAC 呈显著正相关($P<0.05$),与 HAC/FAC 呈极显著负相关($P<0.01$)。

2.5　土壤团聚体胶结能力主成分分析

土壤团聚体胶结能力受多种因素影响,各因素信息存在重叠且有一定关联性,仅用 1 项指标表征土壤团聚体胶结能力,往往得到的结果比较片面[15]。为了全面评价不同母质和利用方式土壤团聚体胶结能力,在不同粒径(<0.053,0.053~0.25,0.025~2,2~5 mm)团聚体中分别选取有机碳(SOC)、腐殖酸总碳(HUAC)、胡敏酸碳(HAC)、富里酸碳(FAC)、胡敏酸碳/富里酸碳(HAC/ FAC)、游离态铁(Fe_{fr})、络合态铁(Fe_{co})、晶质态铁(Fe_{cr})、非晶质态铁(Fe_{un})共 9

个指标，进行主成分分析。根据特征值>1 的原则提取主成分[15]，分别得到不同粒径团聚体的因子载荷、特征值和贡献率(表 4)。

因子载荷绝对值最大的指标，可作为表征主成分的主要指标[15]。在<0.053 mm 团聚体中提取出 2 个主成分(表 4)，可以解释原始数据信息的 81.61%，第 1 主成分以 HAC/FAC 为主要指标，第 2 主成分以 SOC 为主要指标，表明在<0.053 mm 团聚体中有机碳及其组分起主导作用。在 0.053～0.25，0.25～2，2～5 mm 团聚体中均提取出 3 个主成分(表 4)，分别可以解释原始数据信息的 93.43%，94.36%，90.71%，各主成分因子载荷绝对值最大的指标均包括有机碳组分和铁氧化物，说明在>0.053 mm 粒径中，有机碳组分和铁氧化物共同影响土壤团聚体胶结能力。

表 3 不同粒径团聚体稳定性与有机碳组分和铁氧化物形态的相关分析

项目	稳定性指标/mm	<0.053 mm	0.053～0.25 mm	0.25～2 mm	2～5 mm
SOC	MWD	−0.031	0.615**	0.061	0.438*
	GMD	0.024	0.598**	0.018	0.352
HUAC	MWD	0.010	0.527**	0.218	0.462*
	GMD	0.087	0.563**	0.271	0.472*
HAC	MWD	−0.623**	−0.436*	−0.153	−0.023
	GMD	−0.608**	−0.483*	−0.096	−0.041
FAC	MWD	0.360	0.619**	0.421*	0.598**
	GMD	0.440*	0.666**	0.468*	0.617**
HAC/FAC	MWD	−0.519**	−0.643**	−0.894**	−0.664**
	GMD	−0.570**	−0.713**	−0.875**	−0.687**
Fe_{fr}	MWD	0.388**	0.530**	0.238	0.108
	GMD	0.447*	0.536**	0.250	0.126
Fe_{co}	MWD	0.439**	0.462**	0.139	0.345
	GMD	0.502**	0.518**	0.250	0.438*
Fe_{cr}	MWD	0.360	0.500**	0.246	0.100
	GMD	0.420*	0.518**	0.268	0.133
Feun	MWD	−0.002	0.269	0.109	0.087
	GMD	−0.050	0.192	0.051	0

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关；** 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 4 不同粒径团聚体主成分分析的因子载荷、特征值和贡献率

参数	<0.053 mm		0.053～0.25 mm			0.25～2 mm			2～5 mm		
	*F*1	*F*2	*F*1	*F*2	*F*3	*F*1	*F*2	*F*3	*F*1	*F*2	*F*3
有机碳 SOC	0.288	0.927	0.800	0.546	0.156	0.859	0.310	−0.088	0.647	0.511	0.347
腐殖酸总碳 HUAC	0.434	0.848	0.892	0.101	0.370	0.966	−0.191	0.051	0.959	−0.148	0.209
胡敏酸碳 HAC	−0.495	0.743	−0.477	0.669	0.413	0.907	−0.017	0.396	0.825	0.242	0.484
富里酸碳 FAC	0.771	0.547	0.961	−0.104	0.223	0.931	−0.280	−0.155	0.913	−0.333	0.040
胡富比 HAC/FAC	−0.937	−0.058	−0.931	0.199	−0.137	−0.161	0.386	0.908	−0.539	0.449	0.637
游离态铁 Fe_{fr}	0.891	−0.430	0.741	0.301	−0.590	0.965	0.162	−0.046	0.928	−0.020	−0.177
络合态铁 Fe_{co}	0.499	0.509	0.834	−0.301	0.360	0.487	−0.780	0.265	0.021	−0.908	0.250
晶质态铁 Fe_{cr}	0.867	−0.467	0.759	0.168	−0.607	0.974	0.059	−0.022	0.917	−0.127	−0.101
非晶质态铁 Fe_{un}	−0.358	0.583	−0.023	0.933	0.042	0.577	0.732	−0.183	0.504	0.619	−0.526
特征值	3.911	3.434	5.274	1.887	1.248	5.837	1.534	1.121	5.099	1.879	1.186
方差贡献率/%	43.457	38.153	58.604	20.964	13.865	64.857	17.048	12.457	56.661	20.877	13.174
累计贡献率/%	43.457	81.610	58.604	79.568	93.433	64.857	81.905	94.362	56.661	77.538	90.712

用每个指标分别对应于各个团聚体粒径主成分的载荷值除以主成分相对应的特征值开平方根即可得到每个指标分别对应的各个主成分的特征向量，以特征向量为系数与对应的各指标标准化数据乘积后再加和，可以得到不同主成分的得分值[15]；再根据主成分所占贡献率到综合得分，并将其进行排序(表 5)。结果显示，砂页岩母质发育旱地土壤<0.053 mm 团聚体、砂页岩母质发育林地土壤 0.053～0.25 mm 团聚体、花岗岩母质发育林地土壤 0.25～2 mm 团聚体和第四纪红土发育林地土壤 2～5 mm 团聚体

胶结能力最优,土壤团聚体团聚能力最好。

3 讨论

3.1 土壤团聚体分布和稳定性

>0.25 mm 水稳性团聚体的数量通常可以用来判别土壤结构的好坏,其含量和质量越高,表明土壤抗蚀能力越好,土壤结构稳定性越强[16]。本研究表明,不同母质和利用方式下土壤团聚体均以>0.25 mm 含量最多(图 1),表明供试土壤团聚体的团聚度高,稳定性好且土壤结构优良,这得益于研究区好的土壤质地条件,丰富的水热资源。土壤团聚体的稳定性通常用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)指标来评价,其值越大,表明土壤的团聚度和稳定性越强[17]。

本研究中,MWD、GMD 均在林地土壤中最高(图 2),水田和旱地较低,这与韩新生等[18]研究结果相似,主要由于林地覆盖面较大,受人类活动干扰少,林地地表大量的凋落物、微生物和根系分解为有机质、多糖等胶结物质,有利于菌丝对林地土壤的缠绕作用,从而促进土壤>0.25 mm 团聚体的形成,增强团聚体的稳定性;而农田频繁耕作破坏土壤颗粒结构,增加土壤通气性,导致土壤颗粒保护作用变差,土壤结构变疏松,加剧土壤结构的破坏程度[19]。

表 5　不同母质和利用方式土壤团聚体胶结能力综合排序

团聚体直径/mm	母质	利用方式	主成分			综合得分	综合排名
			*F*1	*F*2	*F*3		
<0.053	花岗岩(G)	林地(FL)	2.547	−0.374	−	0.964	3
		水田(PF)	−0.040	−0.891	−	−0.357	5
		旱地(UL)	−0.438	−1.540	−	−0.778	7
	第四纪红土(Q)	林地(FL)	−0.747	−2.083	−	−1.119	8
		水田(PF)	−3.053	−0.367	−	−1.467	9
		旱地(UL)	1.056	1.595	−	1.067	2
	砂页岩(S)	林地(FL)	2.897	−0.978	−	0.886	4
		水田(PF)	−2.284	0.670	−	−0.737	6
		旱地(UL)	0.062	3.968	−	1.541	1
0.053～0.25	花岗岩(G)	林地(FL)	1.561	0.308	−0.741	0.877	3
		水田(PF)	0.221	0.141	−0.095	0.146	5
		旱地(UL)	−1.308	0.094	−1.351	−0.934	6
	第四纪红土(Q)	林地(FL)	−0.124	2.618	−1.022	0.335	4
		水田(PF)	−2.580	−0.944	0.640	−1.621	9
		旱地(UL)	−1.733	−1.758	−0.188	−1.410	8
	砂页岩(S)	林地(FL)	5.016	−1.420	−0.055	2.634	1
		水田(PF)	−1.670	−0.430	0.368	−1.018	7
		旱地(UL)	0.615	1.391	2.444	0.991	2
0.25～2	花岗岩(G)	林地(FL)	3.228	−0.396	−1.173	1.880	1
		水田(PF)	2.228	−0.084	1.928	1.671	2
		旱地(UL)	0.866	0.584	0.701	0.748	4
	第四纪红土(Q)	林地(FL)	1.769	2.272	−0.809	1.434	3
		水田(PF)	−1.109	0.417	−0.110	−0.662	6
		旱地(UL)	−1.130	−0.483	0.832	−0.712	7
	砂页岩(S)	林地(FL)	1.052	−2.470	−0.788	0.163	5
		水田(PF)	−3.427	0.287	−1.077	−2.308	9
		旱地(UL)	−3.476	−0.127	0.497	−2.214	8
2～5	花岗岩(G)	林地(FL)	0.653	−1.260	−1.292	−0.063	6
		水田(PF)	1.569	−0.874	−0.424	0.651	3
		旱地(UL)	1.626	−0.827	−0.344	0.703	2
	第四纪红土(Q)	林地(FL)	2.987	2.361	−0.487	2.122	1
		水田(PF)	0.149	1.470	0.255	0.425	5
		旱地(UL)	−2.538	1.184	1.318	−1.017	8
	砂页岩(S)	林地(FL)	1.200	−1.665	2.025	0.599	4
		水田(PF)	−1.707	−0.118	0.116	−0.976	7
		旱地(UL)	−3.940	−0.271	−1.167	−2.443	9

3.2 土壤团聚体有机碳及其组分对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体是土壤有机碳稳定和保护的载体，是土壤有机碳储存的场所，团聚体的粒径大小不同，储存有机碳组分和能力也不同[20]。本研究发现，不同母质的林地土壤团聚体有机碳主要集中在>0.25 mm 粒径，水田和旱地土壤团聚体有机碳主要集中在<0.053 mm 粒径，不同利用方式土壤有机碳含量分布规律为林地>水田>旱地(图 3)，这与前人[21]研究一致，表明土壤有机碳不仅存在于大团聚体中，也存在于微团聚体中。有机碳作为团聚体形成中比较重要的影响因素，微团聚体在各种影响因素的作用下形成大团聚体，有机碳也随之向大团聚体富集[22]。同时新鲜输入的有机物质进入土壤后，首先在其内部形成粒径相对较小的微团聚体，再与土壤微团聚体通过胶结作用聚合为大团聚体，然后在人为扰动等破坏作用下大团聚体内部粗颗粒有机质分解或大团聚体破碎释放出微团聚体，有机碳也随之富集在微团聚体上[23]。本研究中相对于林地土壤来说的，水稻土和旱地土壤耕作频繁，导致大团聚体不断破碎成微团聚体，有机碳向微团聚体富集；另外，林地土壤由于林木凋落物的增加以及人为扰动少的原因，导致林地土壤有机碳含量高[24]。

腐殖酸作为土壤有机质的主体(约占 60%～80%)，在促进团聚体的形成与稳定中发挥着重要作用，由腐殖酸参与形成团聚体是土壤固碳的重要机制[25]。腐殖酸和团聚体之间存在“双向分选”，即不同粒级团聚体中腐殖酸的数量与结构特征不同，腐殖酸性质上的差异又将会胶结形成不同粒级的团聚体[26]。本研究发现，不同利用方式的土壤团聚体腐殖酸碳及其组分含量分布规律不同，土壤团聚体腐殖酸碳及其组分含量在林地利用方式下主要集中在>2 mm 粒径，在水田和旱地利用方式下主要集中在<0.25 mm 粒径，且土壤腐殖酸碳及其组分含量分布规律为林地>水田>旱地(图 3)。腐殖酸碳含量高能够促进团聚体的稳定，同时改善土壤团聚体分布状况，优化土壤结构[26]。由此说明与水田和旱地相比，林地土壤团聚体较为稳定。主要原因是林地土壤凋落物多，不断补充土壤腐殖酸碳及组分的含量，促进更多的大团聚体形成并且在大团聚体中不断富集，而水田和旱地土壤由于翻耕作用，大团聚体不断破碎形成微团聚体，导致微团聚体增多，腐殖酸碳及组分向微团聚体富集[27]。另外，3 种利用方式的胡敏酸/富里酸<1，这与前人[27]研究南方土壤中腐殖酸一般以富里酸占优势的结论相一致。这是由于南方温度相对较高，相对湿度较大，植被覆盖度大，微生物降解作用强所致。本研究中各粒径团聚体的腐殖酸碳、富里酸碳与>0.25 mm 团聚体呈极显著正相关，表明大团聚体的腐殖酸碳及富里酸碳能够促进团聚体的形成。

3.3 土壤团聚体铁氧化物形态对土壤团聚体稳定性的影响

铁氧化物对土壤中有机质具有保护作用，与有机质通过络合反应影响团聚体稳定性[28]，同时可以强烈吸附在黏粒表面，形成氧化物胶膜，促进土粒之间紧密结合，形成稳定的团聚体[29]，在有机质含量低(<20 g/kg)的情况下，铁氧化物在团聚体稳定中起直接作用[30]。本研究中不同母质和利用方式土壤团聚体游离态铁含量较高(图 4)，表明赤红壤区土壤的铁氧化物多以游离态铁的形式存在，主要与区域湿润多雨、风化程度高、脱硅富铝化有关[31]。

水稳性团聚体中氧化物含量随团聚体粒径的变化因土壤类型、发生层次而异，说明影响团聚体的形成和稳定的土壤因素相应存在差异[32]。本研究中，<0.053，0.053～0.25 mm 团聚体 MWD 和 GMD 与游离态铁(Fe_{fr})、络合态铁(Fe_{co})呈极显著正相关(表 3)($P<0.01$)，由于游离态铁常结合黏土矿物，形成复合物，对土壤团聚体的稳定性有提高作用[33]，而络合态铁对促进新团聚体的形成和维持旧团聚体的稳定也具有积极作用，同时铁氧化物通过在溶液中充当絮凝剂、充当黏粒和有机分子的胶结剂、作为凝胶在黏粒表面沉淀 3 种方式来影响土壤团聚体的稳定性[9]，因此，Fe_{fr} 和 Fe_{co} 是团聚体形成过程中的主要铁氧化物。各形态铁均表现出明显的向较细颗粒富集，这与贾龙研究结果相似[34]。相关性分析(表 3)表明，<0.053 mm 团聚体晶质氧化铁与 MWD、GMD 百分比呈显著相关($P<0.05$)，这是因为晶质氧化物主要以与黏粒结合的形式存在，同时抑制非晶质氧化物的存在，由于其较高的含量，其在土壤中的表面积大于非晶质氧化物[35]。

4 结论

(1)广东省赤红壤区土壤团聚体含量以>0.25 mm 为主，其中林地土壤 2～5 mm 团聚体含量在花岗岩母质发育土壤中最高；水田和旱地土壤 0.25～2 mm 团聚体含量在花岗岩和第四纪红土母质发育土壤中最高；平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)在砂页岩母质发育土壤和林地土壤中最高。

(2)团聚体有机碳及其组分在林地土壤主要分布在 2～5 mm 粒径中，在水田和旱地土壤主要分布在<0.053 mm 粒径中；团聚体不同形态铁氧化物在林地土壤主要分布在<0.053，0.25～2 mm 中，在水田和旱地土壤主要分布在<0.053mm 粒径中。

(3)母质和利用方式对团聚体稳定性影响显著，主要是由于 HAC、HAC/FAC、Fe_{fr} 和 Fe_{co} 的差异，同时砂页岩母质发育的林地土壤团聚体具有较好的胶

结能力,团聚体结构稳定性高。

参考文献:

[1] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.

[2] 谢丽华,廖超林,林清美,等.有机肥增减施后红壤水稻土团聚体有机碳的变化特征[J].土壤,2019,51(6):1106-1113.

[3] 王艳玲,王燕,李凌宇,等.成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J].土壤通报,2013,44(4):776-785.

[4] 陈山,杨峰,林杉,等.土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):211-216.

[5] 谷忠元,康黎,罗梦娟,等.湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素[J].水土保持通报,2018,38(5):58-63,69.

[6] Peng X H, Yan X Y, Zhou H, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization[J]. Soil and Tillage Research,2015,146:89-98.

[7] Wu X L, Cai C, Wang J G, et al. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China[J].Soil and Tillage Research, 2016,157:11-22.

[8] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.

[9] 于孟生.侵蚀红壤团聚体稳定性及其与铁铝氧化物的关系[D].武汉:华中农业大学,2007.

[10] 王勇,张建辉,李富程.耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):180-185.

[11] 贾重建,刘红宜,卢瑛,等.土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响[J].热带地理,2014,34(5):681-689.

[12] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012:8-187.

[13] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1986,50:627-633.

[14] 魏亚飞,王辉,谭帅,等.套种对南方红壤坡耕地经济果园土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].应用生态学报,2020,31(5):1617-1624.

[15] 唐秀梅,黄志鹏,吴海宁,等.玉米/花生间作条件下土壤环境因子的相关性和主成分分析[J].生态环境学报,2020,29(2):223-230.

[16] 马东方,袁再健,吴新亮,等.华南花岗岩侵蚀区不同植被类型坡面土壤有机碳分布和团聚体稳定性[J].水土保持学报,2020,34(5):137-144.

[17] 刘杰,马艳婷,王宪玲,等.渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2019,40(7):3361-3368.

[18] 韩新生,马璠,郭永忠,等.土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):114-120.

[19] 宋影,辜夕容,严海元,等.中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态[J].环境科学,2014,35(3):1151-1158.

[20] 毛艳玲,杨玉盛,邹双全,等.土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响[J].山地学报,2007,25(6):706-713.

[21] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.

[22] 谢贤健.不同巨桉人工林对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):211-215,225.

[23] 吴新亮.几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D].武汉:华中农业大学,2018.

[24] 杨俊.南方红壤区马尾松人工林地浅沟表层土壤水稳性团聚体空间差异性[D].南昌:南昌工程学院,2019.

[25] Igwe C A, Zarei M, Stahr K. Stability of aggregates of some weathered soils in south-eastern Nigeria in relation to their geochemical properties[J].Journal of Earth System Science,2013,122:1283-1294.

[26] 梁尧,苑亚茹,韩晓增,等.化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1586-1594.

[27] Zhu F, Li Y B, Xue S G, et al. Effects of iron-aluminium oxides and organic carbon on aggregate stability of bauxite residues[J]. Environmental Science and Pollution Research,2016,23:9073-9081.

[28] 王璐莹,秦雷,吕宪国,等.铁促进土壤有机碳累积作用研究进展[J].土壤学报,2018,55(5):1041-1050.

[29] 朱秋莲,程曼,安韶山,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体特征及腐殖质分布的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):247-251,257.

[30] 王晶,何忠俊,王立东,等.高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J].土壤学报,2010,47(4):723-733.

[31] 佘立,蔡崇法,吴新亮,等.中南地区典型地带性土壤团聚体抗张强度的变化及影响因素[J].水土保持学报,2017,31(5):152-157.

[32] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J].Geoderma,2015,247/248:24-37.

[33] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2016,36(9):2588-2596.

[34] 贾龙.植被恢复对退化红壤微团聚体及其胶结物质的影响[D].南昌:南昌工程学院,2018.

[35] Sung C T B. Aggregate stability of tropical soils in relation to their organic matter constituents and other soil properties[J]. Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science,2012,35(1):135-148.