

南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性

冷 暖¹, 邓羽松¹, 林立文¹, 王金悦¹, 黄 娟¹, 杨钙仁¹, 刘淑娴¹, 黄智刚^{2,3}

(1.广西大学林学院, 南宁 530004; 2.广西大学农学院, 南宁 530004;

3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 团聚体是土壤的基本结构单位, 其稳定性是评价土壤质量的重要指标。以南亚热带地区不同母质(石灰岩、第四纪红黏土、砂页岩)发育的土壤作为研究对象, 采用湿筛法和 LB 法测定不同母质发育土壤团聚体稳定性特征。结果表明: (1) 随着土层深度的增加, 土壤容重呈上升趋势, 而孔隙度、有机质和游离氧化铁含量呈下降趋势。砂页岩母质发育的土壤有机质含量最高, 为 22.44~42.97 g/kg。石灰岩和第四纪红黏土母质发育的土壤以黏粒(40.93%, 42.51%)和粉粒(41.69%, 42.31%)为主, 砂页岩母质发育的土壤黏粒含量最低, 为 33.79%。(2) 经湿筛法处理后, 石灰岩母质发育土壤水稳性团聚体含量为 91.58%~92.31%, 第四纪红黏土母质发育土壤水稳性团聚体含量为 76.45%~90.80%, 砂页岩母质发育土壤水稳性团聚体含量为 79.18%~86.67%, 3 种土壤团聚体的稳定性都随着土层深度增加而降低。(3) LB 法处理后土壤团聚体 MWD 值均表现为慢速湿润处理>预湿润振荡处理>快速湿润处理, 砂页岩母质发育的 40—60 cm 土层对消散和机械破碎作用最为敏感, 其相对消散指数 RSI 和相对机械破碎指数 RMI 分别为 0.78 和 0.42。不同母质土壤团聚体稳定性均与黏粒、有机质、游离态铁含量呈正相关。

关键词: 土壤团聚体; 南亚热带; 稳定性; 土壤母质

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0080-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.012

Characteristics and Stability of Soil Aggregates Developed from Different Parent Materials in the South Subtropical Region

LENG Nuan¹, DENG Yusong¹, LIN Liwen¹, WANG Jinyue¹,

HUANG Juan¹, YANG Gairen¹, LIU Shuxian¹, HUANG Zhigang^{2,3}

(1.College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004; 2.College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004;

3.Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Aggregate is the basic structural unit of soil, and its stability is an important index to evaluate soil quality. In this paper, the stability of soil aggregates developed from different parent materials (Limestone, Quaternary laterite, Sand shale) in the south subtropical region was determined by wet-sieving method and Le bissonnais method. The results showed that: (1) With the increase of soil depth, soil bulk density increased gradually, while porosity, organic matter and free iron oxide content decreased. The highest content of organic matter was 22.44 ~ 42.97 g/kg. The clay (40.93% and 42.51%) and silt (41.69% and 42.31%) were the main parent materials of Limestone soil and Quaternary laterite soil, while clay content of Sand shale soil was the lowest, 33.79%. (2) After wet-sieving, the contents of water stable aggregates in Limestone soil, Quaternary Red soil and Sand Shale soil were 91.58% ~ 92.31%, 76.45% ~ 90.80%, and 79.18%~86.67%, respectively. The stability of aggregates in soils decreased with the increase of soil depth. (3) The MWD values of soil aggregates of the three parent materials were slow-wetting treatment > pre-wetting shock treatment > rapid-wetting treatment, The 40—60 cm soil layer developed from Sand shale was most sensitive to dissipation and mechanical crushing, and its relative dissipation index RSI and relative mechanical crushing index RMI were 0.78 and 0.42, respectively. The stability of soil aggregates was posi-

收稿日期: 2021-04-09

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505402); 广西科技重大专项(AA17204078-4); 广西自然科学基金项目(2016JJ1A30212)

第一作者: 冷暖(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与恢复生态研究。E-mail: huanhaun4@qq.com

通信作者: 邓羽松(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

tively correlated with clay, organic matter and free iron content.

Keywords: soil aggregate; south subtropical region; stability; soil parent material

土壤侵蚀是目前人类面临的重大环境危机之一, 高强度的土地开发利用使得生态破坏、水土流失等问题日益严重^[1]。南亚热带水热资源丰富, 夏季常发生连续性集中降雨, 从而形成地表径流, 加剧该地域地表侵蚀现象^[2]。团聚体是土壤的基本结构单元, 土壤侵蚀往往伴随着团聚体的破碎迁移产生^[3]。土壤团聚体的稳定性是指团聚体抵抗外力作用而保持其原有形态的能力, 包括水稳性、力稳性、化学稳定性等^[4]。已有研究^[5-6]表明, 水稳性团聚体的数量 $WSA_{0.25}$ 是评价土壤质量的重要指标, 其值大于 70% 则说明土壤结构良好。有学者^[7]认为, 可以通过增强团聚体的稳定性来减缓地表径流引起的土壤侵蚀。

土壤团聚体的稳定性受土壤母质、理化性质、气候条件、土地利用方式、植被等多种因素影响。土壤的理化性质, 尤其是有机质、黏粒含量、容重、孔隙度等, 是土壤质量评价的重要标准^[8]。胶结物质的种类和数量(有机质、氧化物等)对土壤团聚体的形成和稳定尤为重要^[9]。成土母质是土壤形成的物质基础, 可以影响土壤的营养状况和物理化学性质, 从而调控一系列生物化学过程^[10], 决定土壤中有机物和无机胶体的数量和性质。对湘东地区的土壤研究^[11]表明, 成土母质和利用方式等外部因素通过改变土壤质地、有机质含量间接影响了土壤团聚体稳定性。此外, 附着在黏粒表面的氧化物也是团聚作用中的重要物质。亚热带地区常年高温多雨, 独特的气候条件使得该区域内风化淋溶作用强烈, 土壤侵蚀过程和强度不同于黄土高原等其他地区。目前对土壤理化性质与团聚体稳定性关系研究多集中于黄土丘陵区、东北黑土区等地^[12-13], 而对南亚热带区不同母质发育土壤团聚体稳定性研究鲜见报道。第四纪红黏土和砂页岩发育的红壤是南亚热带的代表性土壤。广西南部处于南亚热带地区, 长期种植桉树、甘蔗等农作物使得该地区土壤肥力流失严重, 碳酸盐岩发育而成的石灰岩是该地区的常见母质。广西地区的水土流失现象日益严重, 土壤侵蚀面积已高达 5.05 万 km^2 , 占总面积的 21.34%, 已成为西部开发战略的重点与难点^[14]。

目前土壤团聚体水稳性的测定方法主要有湿筛法和 Le Bissonnais(LB)法^[15-16]。相较于传统的湿筛法, LB 法 3 种处理方法模拟了消散作用、不均匀膨胀作用和机械破碎作用, 可以更好地区分团聚体破碎机理^[17]。为深入研究南亚热带地区土壤理化性质与团聚体稳定性之间的关系, 本文以广西地区石灰岩、第四纪红黏土、砂页岩

发育的土壤作为研究对象, 分析其土壤结构和理化性质的差异性。通过湿筛法和 LB 法测定 3 种母质土壤团聚体稳定性及破坏机制。此研究结果有利于深刻认识南亚热带土壤团聚体稳定性特征, 并为优化南亚热带地区土壤结构提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区南宁市($107^{\circ}45'—108^{\circ}51'E, 22^{\circ}13'—23^{\circ}32'N$), 地处南亚热带和北热带的过渡带, 属于南亚热带季风气候区。全年热量充足、雨量充沛, 年均气温 $21.6^{\circ}C$, 年均降水量 1 304.2 mm, 且多集中于 5—9 月, 年平均相对湿度为 79%, 常年受洪涝、干旱、低温灾害的影响。样区地形为低山丘陵, 土地利用方式为灌木混交地, 坡度为 $12^{\circ}—16^{\circ}$, 坡向为东南坡。成土母质以砂页岩(SS)、石灰岩(LS)、第四纪红黏土(QRC)等为主, 土壤类型多为地带性的砖红壤、赤红壤等, 多呈酸性至强酸性。石灰岩母质发育土壤样区位于南宁市马山县($108^{\circ}10'16.68''E, 23^{\circ}40'51.24''N$), 海拔 205 m, 主要植被有青岗栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、海红豆(*Adenanthera pavonina*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)等。第四纪红黏土母质发育土壤样区位于南宁市西乡塘区($108^{\circ}17'6.72''E, 22^{\circ}51'6.84''N$), 海拔 78 m, 主要植被有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、早熟禾(*Poa annua*)、牛筋草(*Eleusine indica*)等。砂页岩母质发育的土壤样区位于南宁市武鸣区($108^{\circ}22'37''E, 22^{\circ}58'37''N$), 海拔 217 m, 主要植被有马尾松(*Pinus massoniana*)、鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等。由于该区域土壤性能较差, 降雨集中且强度大, 加之不合理的土地利用, 土壤侵蚀退化严重。

1.2 样品采集处理

2019 年 5 月, 在研究区内进行土壤调查采样, 选择干扰性较小, 且坡向、坡位、植被类型以及土地利用历史相似的样地。在每个样地内布设 3 个面积为 20 m $\times$ 20 m 的样方, 利用网格法在样方随机选取 3 个采样点, 每个样点挖掘土壤剖面(宽 0.8 m, 深 1.0 m) 3 个。选取发生层完整、土壤侵蚀度低的典型土壤, 顺着土壤表层沿剖面向下按照 0—20, 20—40, 40—60 cm 共分 3 层采集土壤样品。采用 100 cm³ 的钢制环刀(直径 50 mm, 高 50 mm)采集各层土壤样品, 每

个土壤层 3 个重复。此外,同一样地每层采集适量散土。将各地采集好的土样带回实验室,把采集回来的原状土按照其裂隙掰成 10 mm 的小土块,挑出土中的根系、石块等杂物,处理好后放在透气通风处待其自然风干。

1.3 测定方法

1.3.1 湿筛法 取 200 g 风干处理后的土样,依次过 10,7,5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛干筛称重,计算各粒级团聚体的百分比含量。按照干筛比例配成 50 g 的土样,放入团粒分析仪中设置好时间(30 min)和振幅(3 cm)进行湿筛。随后将筛组分开,将留在各级筛子上的土壤团聚体颗粒,洗入铝盒中,在 40 ℃ 的烘箱中烘干 48 h 至恒重,称重并计算各粒径范围团聚体的质量分数。

1.3.2 Le Bissonnais 法 取用干筛得到的 3~5 mm 的土壤团聚体样品,在烘箱中 40 ℃ 烘干 24 h,统一初始含水量后,分别利用 3 种处理方式分析团聚体。(1)快速湿润:取 5 g 土壤团聚体样品缓慢浸入去离子水中,10 min 后用吸管吸去多余水分。(2)慢速湿润:取 5 g 土壤团聚体样品放在滤纸上,静置 30 min 使团聚体完全湿润。(3)预湿润振荡:取 5 g 土壤团聚体样品浸入 95%乙醇并静置 10 min 后,用吸管将多余的乙醇吸干;加入 200 mL 去离子水,翻转摇晃 20 次后静置 30 min,用吸管将多余的水吸出。使用 95%乙醇将团聚体洗入准备好的干铝盒,将处理后的样品在 40 ℃ 的烘箱中烘 48 h 至恒重,烘干后过套筛(2,1,0.5,0.2,0.1 mm),并用分析天平精确称量各粒径范围的团聚体质量,计算各粒级团聚体质量分数。

1.3.3 土壤理化性质测定方法 土壤容重、孔隙度(毛管孔隙和非毛管孔隙)测定采用环刀法;有机质测定采用重铬酸钾外加热法;土壤机械组成测定采用吸管法;土壤游离态铁铝锰氧化物(Fe_d、Al_d、Mn_d)采用连二亚硫酸钠—柠檬酸钠—重碳酸钠法(DCB 法)进行提取,具体步骤均参照张甘霖等^[18]的方法。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 数据处理

(1)平均质量直径 MWD 为:

$$MWD=\sum_{i=1}^n x_i w_i$$

式中:MWD 为土壤团聚体平均质量直径(mm); x_i 为任一粒径范围内土壤平均直径(mm); w_i 为第 i 粒级的团聚体占总团聚体的百分含量(%)。

(2)水稳性团聚体含量 WSA_{0.25} 为:

$$WSA_{0.25}=\frac{C_w}{C_t}$$

式中: C_w 为 >0.25 mm 团聚体含量(g); C_t 为团聚体

总量(g)。

(3)相对消散指数 RSI、相对机械破碎指数 RMI 为:

$$RSI=(MWD_{sw}-MWD_{fw})/MWD_{sw}\times 100\%$$

$$RMI=(MWD_{sw}-MWD_{ws})/MWD_{sw}\times 100\%$$

式中: MWD_{fw} 为快速湿润处理后团聚体平均直径(mm); MWD_{sw} 为慢速湿润处理后团聚体平均直径(mm); MWD_{ws} 为预湿润振荡处理后团聚体平均直径(mm)。

(4)团聚体特征参数 A_s 为:

$$A_s=RMI\times RSI$$

1.4.2 数据分析 采用 Excel 2010 软件对试验数据进行处理和作图,利用 SPSS 24 软件进行数据分析,运用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较差异,邓肯(Duncan)法检验差异显著性($P<0.05$),皮尔逊(Pearson)法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质分析

土壤容重、孔隙度、有机质、游离氧化物含量和机械组成等理化性质受成土母质、土地利用方式、气候地理条件、植被覆盖等多种因素影响,是判断团聚体稳定性的重要标准。由表 1 可知,土壤容重由大到小依次为石灰土(1.47 g/cm³)、第四纪红黏土(1.34 g/cm³)和砂页岩赤红壤(1.31 g/cm³),变化范围为 1.20~1.62 g/cm³。3 种土壤的容重都随着土层深度的增加而增大。总体来看,石灰土容重最大,土壤孔隙度较小。总孔隙的均值大小依次为砂页岩赤红壤(50.42%)>第四纪红黏土(49.37%)>石灰土(44.44%)。不同土壤的有机质含量存在明显差异,砂页岩赤红壤的含量最高,其次是石灰土、第四纪红黏土,范围在 10.15%~42.97%。

从垂直方向来看,3 种母质土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和有机质含量均呈现随着土层深度增加而降低的趋势,这与土壤容重变化趋势相反。3 种土壤有机质含量的变化范围为 10.15~42.97 g/kg,呈现砂页岩赤红壤>石灰土>第四纪黏土,且均随土层加深而减少。游离氧化铁在 3 种土壤团聚体中的含量较高,变化范围为 5.69~11.71 g/kg。游离氧化铝的含量显著低于游离氧化铁,变化范围为 0.62~2.62 g/kg。游离氧化锰在 3 种土壤中的含量最低,变化范围为 0.01~0.23 g/kg。由图 1 可知,石灰土和第四纪红黏土的砂粒含量较少,粉粒和黏粒的含量相差不大,而砂页岩赤红壤主要以砂粒为主。总体来看,石灰土的黏粒、有机质和游离氧化物含量均较高,土壤质地黏重;第四纪红黏土黏粒含量高,有机质和游离氧化物含量较低;砂页岩赤红壤有机质含量高,但砂粒含量高,黏粒含量较低。

表 1 土壤基本理化性质

土层	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	Fe _d / (g·kg ⁻¹)	Al _d / (g·kg ⁻¹)	Mn _d / (g·kg ⁻¹)
LS1	1.28±0.05cd	51.66±1.71ab	33.18±0.46ab	18.49±1.25ab	40.46±4.33a	11.71±1.47a	1.82±0.18b	0.09±0.02ab
LS2	1.53±0.03a	42.34±1.25d	31.93±3.13abc	10.41±4.38d	26.68±2.92cd	9.75±1.11a	1.51±0.13b	0.23±0.06a
LS3	1.61±0.04a	39.32±1.69d	25.59±1.35c	13.74±0.34bcd	16.69±0.72f	7.00±0.37a	0.62±0.01b	0.01±0.00b
QRC1	1.22±0.01d	54.04±0.38a	38.63±1.26a	15.41±1.63bcd	28.21±0.34c	8.67±0.87a	1.57±0.52b	0.08±0.01ab
QRC2	1.39±0.02b	47.62±0.58c	34.77±2.24ab	12.86±2.82bcd	18.69±0.35cf	6.93±3.46a	1.95±0.32b	0.03±0.02b
QRC3	1.42±0.05b	46.45±0.72c	35.65±4.71ab	10.80±2.19cd	10.15±1.18g	5.61±0.42a	1.34±0.03b	0.02±0.01b
SS1	1.20±0.03d	54.80±1.17a	30.91±1.92bc	23.89±1.34a	42.97±0.64a	9.21±0.46a	2.02±0.23b	0.12±0.06b
SS2	1.33±0.04bc	49.81±1.32bc	30.97±3.60bc	18.84±0.52ab	34.32±1.03b	8.92±0.14a	2.62±0.02a	0.10±0.04b
SS3	1.41±0.04b	46.66±1.68c	29.97±0.43bc	16.69±2.04bc	22.44±1.16de	5.77±0.09a	1.94±0.01b	0.03±0.01b

注:LS、QRC、SS 分别为石灰土、第四纪红黏土、砂页岩赤红壤;1、2、3 分别为 0—20、20—40、40—60 cm 土层;表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$)。下同。

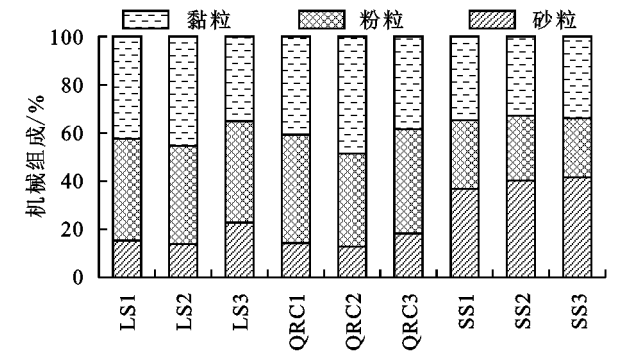


图 1 土壤的机械组成

2.2 湿筛法处理下土壤团聚体稳定性特征

湿筛法是最为常见的团聚体稳定性测定方法之一,可以通过团聚体平均质量直径 MWD、> 0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA_{0.25} 和粒径分布等指标来判断团聚体水稳性。由表 2 可知,湿筛法测得 3 种土壤在 >2、2~1、1~0.5、0.5~0.25、<0.25 mm 粒径团聚体均有分布,石灰土以>2 mm 粒径团聚体为主;第四纪红黏土 0—20、20—40 cm 土层以>2 mm 粒径的团聚体为主,40—60 cm 土层以 0.5~0.25 mm 粒径的团聚体为主;

砂页岩赤红壤 0—20 cm 土层以>2 mm 粒径的团聚体为主,20—40、40—60 cm 土层则以 0.5~0.25 mm 粒径的团聚体为主。3 种土壤的大粒径团聚体均集中分布于土壤表层,且随着土层加深,平均重量直径(MWD)均呈现下降趋势,变化范围分别为 2.54~2.69、0.99~2.49、1.19~2.45 mm,总体呈现石灰土>第四纪红黏土>砂页岩赤红壤。3 种土壤各土层水稳性团聚体含量介于 76.45%~92.31%,从大到小依次为石灰土、第四纪红黏土、砂页岩赤红壤。不同母质发育的土壤水稳性团聚体数量在同一土层之间有一定差异性,但均呈现石灰土>第四纪红黏土>砂页岩赤红壤的趋势。随着土层深度增加,3 种土壤中>0.25mm 水稳性团聚体含量呈现下降趋势,其中砂页岩赤红壤下降幅度最大。第四纪红黏土和砂页岩赤红壤团聚体稳定性随着土层深度增加而减弱,各层次的 MWD 值和 WSA_{0.25} 值差异明显。而石灰土 MWD 呈现 LS1>LS3>LS2,WSA_{0.25} 呈现 LS3>LS1>LS2,其各层次的 MWD 值和 WSA_{0.25} 值差异不大,但均高于第四纪红黏土和砂页岩赤红壤。

表 2 土壤的团聚体稳定性及粒径分布

土层	粒径分布/%					MWD/mm	WSA _{0.25} /%
	>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm		
LS1	65.42±0.91a	13.23±0.11f	7.12±0.39c	6.39±0.49b	7.84±0.09c	2.69±0.03a	92.16±0.09a
LS2	64.21±0.21ab	11.87±0.79cde	9.13±0.77c	6.37±0.01b	8.42±0.18c	2.54±0ab	91.58±0.18a
LS3	66.06±0.64a	12.91±0.31c	7.16±0.03c	6.18±0.22b	7.69±0.15c	2.60±0.02a	92.31±0.15a
QRC1	63.62±0.10ab	9.77±0.07ef	7.99±0.05c	9.42±0.04b	9.20±0.04c	2.49±0ab	90.80±0.04a
QRC2	40.90±0.72c	18.18±0.06a	20.10±0.38a	10.69±0.11b	10.13±0.17c	1.92±0.02c	89.87±0.17a
QRC3	13.81±0.13d	13.92±0.16bc	14.70±0.28b	34.02±0.72a	23.55±0.15ab	0.99±0.01d	76.45±0.15bc
SS1	62.68±9.64bc	8.83±1.53def	7.75±1.43c	7.41±4.83b	13.33±1.84bc	2.45±0.28bc	86.67±1.84ab
SS2	24.13±1.31d	14.96±0.58b	13.46±1.30b	26.74±2.47a	20.71±0.44ab	1.32±0.04d	79.29±0.44bc
SS3	20.67±5.78d	13.71±1.00cd	11.03±1.24b	33.76±2.50a	20.82±8.04a	1.19±0.20d	79.18±8.04c

注:MWD 为平均重量直径;WSA 为水稳性团聚体含量。

在所有供试土壤中,第四纪红黏土 QRC3 土层的团聚体稳定性最弱。在相似的土地利用状况,除土层 SS3

之外,砂页岩赤红壤的团聚体稳定性总是低于石灰土和第四纪红黏土。研究区内 3 种不同母质发育的土壤

经湿筛法处理后,水稳性团聚体含量($WSA_{0.25}$)均大于 76.45%,说明 3 种土壤结构都相对稳定。本研究表明,在相似的土地利用条件下,石灰土团聚体稳定性总是高于第四纪黏土和砂页岩赤红壤,第四纪红黏土团聚体结构较为稳定,砂页岩赤红壤 0—20 cm 土层稳定性较好,但与下层土壤稳定性差异较大。

2.3 LB 法处理下土壤团聚体稳定性特征

传统的湿筛法运用广泛,但无法判断团聚体的破坏机制,而 LB 法克服了这个缺点,可以很好地将消散作用(快速湿润处理)、机械破碎作用(预湿润振荡处理)及团聚体内部黏土涨缩导致的破坏(慢速湿润处理)区分开来。根据 LB 法的标准^[16],团聚体稳定性可分为极不稳定($MWD<0.4$ mm)、不稳定(0.4 mm $\leq MWD<0.8$ mm)、稳定(0.8 mm $\leq MWD<1.3$ mm)、较稳定(1.3 mm $\leq MWD<2.0$ mm)和极稳定($MWD\geq 2.0$ mm) 5 个等级。由图 2 可知,3 种不同湿润速度处理后的石灰土团聚体的 MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 、 MWD_{WS} 值的变化范围依次为 2.13~2.71, 2.33~3.13, 3.48~3.49 mm,第四纪红黏土团聚体的 MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 、 MWD_{WS} 值的变化范围依次为 0.69~1.72, 2.73~3.19, 3.21~3.34 mm,砂页岩赤红壤团聚体的 MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 、 MWD_{WS} 值的变化范围依次为 0.48~1.95, 3.07~3.26, 2.16~2.90 mm。3 种母质土壤不同层次间的 MWD_{FW} 值差异最大, MWD_{SW} 值差异最小。这说明 3 种不同母质发育的土壤经慢速湿润处理后团聚体稳定性和抗蚀能力最强,经快速湿润处理后最弱,预湿润振荡处理介于两者之间。由此可知,对 3 种土壤团聚体产生破坏影响的主要是快速湿润导致的消散作用和预湿润振荡导致的机械扰动作用。

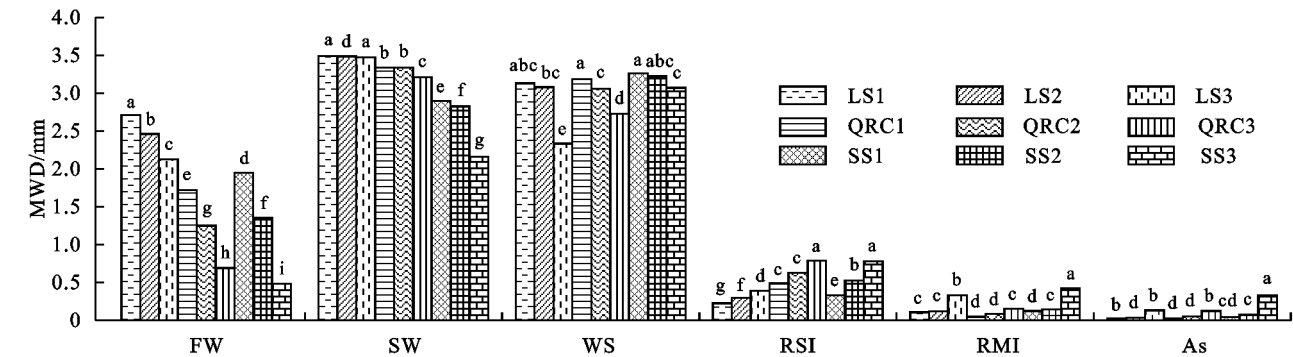


图 2 LB 法处理下土壤团聚体稳定性

2.4 土壤团聚体稳定性与理化性质相关性分析

由表 3 可知,经湿筛法处理后的团聚体稳定性参数与游离态氧化铁呈正相关。LB 法 3 种处理下的 MWD 值与粉粒含量和毛管孔隙度相关性不显著,与砂粒含量呈负相关,与黏粒、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、游离态铁铝锰呈显著或极显著正相关。

可以通过相对消散指数 RSI、相对机械破碎指数 RMI、团聚体稳定性特征参数 A_s 来观测不同母质土壤对消散作用和机械破碎作用的敏感度。由图 2 可知,石灰土的 RSI 值、RMI 值和 A_s 值的范围依次为 0.22~0.39, 0.10~0.33, 0.02~0.13,第四纪红黏土的 RSI 值、RMI 值和 A_s 值的范围依次为 0.48~0.79, 0.04~0.15, 0.02~0.12,砂页岩赤红壤的 RSI 值、RMI 值和 A_s 值的范围依次为 0.33~0.78, 0.12~0.42, 0.04~0.33。RSI 和 RMI 的值越大,土壤团聚体对消散作用和机械破碎作用敏感程度越高, A_s 值越大,其土壤团聚体的稳定性越低。由此可知,石灰岩和第四纪红黏土母质发育的 LS1 和 QRC1 土层稳定性最强,砂页岩母质发育的 SS3 土层稳定性最弱,其对消散作用和机械破碎作用的敏感程度最高。从 RSI 和 RMI 来看,第四纪红黏土对消散作用的敏感程度更高,而石灰土对机械破坏作用的敏感程度更高。

总体来看,石灰土的土壤团聚体稳定性强于第四纪红黏土和砂页岩赤红壤。石灰土经 3 种处理后的 MWD 值均 >2 ,说明 3 种土壤中石灰土结构最好,处于极稳定状态。第四纪红黏土和砂页岩赤红壤 3 个层次的土壤稳定性从上到下逐渐减弱,分别处于极稳定状态、较稳定状态和稳定状态。供试土壤经 LB 法不同处理后,团聚体平均重量直径排序均为 $MWD_{FW}<MWD_{WS}<MWD_{SW}$,可见快速湿润引起的消散作用和外应力引起的机械破碎作用是红壤团聚体的主要破碎机制。本试验的采样地位于南亚热带地区,夏季的集中性降雨加剧了地表冲蚀、水土流失等灾害。快速湿润处理正是模拟了土壤团聚体在降雨时封闭气体爆破产生的破坏。

湿筛法与 LB 法中各 MWD 除 MWD_{WS} 都与砂粒含量呈负相关,砂粒含量还与 RMI 呈极显著负相关。黏粒含量与 MWD 和 $WSA_{0.25}$ 总体呈现正相关,尤其是与 MWD_{WS} 相关性显著,与 RMI 负相关性显著。总孔隙度除与 MWD_{SW} 呈极显著正相关外,与其他系数

相关性均不显著。毛管孔隙度与各稳定性指数相关性均不显著,非毛管孔隙度只与 MWD_{ws} 呈显著正相关。有机质与 MWD 呈正相关,尤其与 MWD_{ws} 呈极显著正相关。从相对消散和破碎指数来看,游离态氧化铁与 RSI 呈极显著负相关,砂粒、黏黏粒和毛管孔隙度与 RMI 相关性显著, As 与 Fe_d 和 Mn_d 呈显著负相关。总体来看,砂粒含量越高,土壤团聚体的稳定性越弱;黏粒、有机质和游离氧化铁铝锰的含量越高,土壤团聚体的 MWD 值越大,土壤团聚体的稳定性

越强。团聚体中氧化锰含量较低,但是根据其与各稳定性系数相关性来看,可以推测其在团聚体的形成和稳定中发挥着一定程度的作用。总体分析可得,本试验中所测土壤团聚体稳定性与黏粒含量、有机质、游离态铁铝相关性较好,而与孔隙度、粉粒含量、游离态氧化锰相关性较差。其中,黏粒在慢速湿润处理下与团聚体稳定系数相关性最强,有机质在预湿润振荡处理下与团聚体稳定系数相关性最强,游离氧化铁在快速湿润处理下与团聚体稳定系数相关性最强。

表 3 土壤团聚体稳定性参数和影响因子的相关系数

处理方法	参数	砂粒	粉粒	黏粒	TP	CP	NCP	SOM	Fe_d	Al_d	Mn_d
湿筛法	MWD	-0.38	0.36	0.39	0.03	-0.12	0.03	0.35	0.73 *	-0.30	0.23
	$WSA_{0.25}$	-0.45	0.38	0.43	-0.13	-0.13	-0.12	0.15	0.58	-0.38	0.08
	MWD_{FW}	-0.31	0.32	0.34	0.07	-0.10	0.07	0.47	0.87 * *	-0.23	0.45
	MWD_{ws}	0.18	-0.28	-0.22	0.83 * *	0.07	0.72 *	0.93 * *	0.63	0.70 * *	0.81 * *
LB 法	MWD_{SW}	-0.69 *	0.65	0.70 *	-0.18	0.27	-0.40	0.02	0.53	-0.57	0.08
	RSI	0.23	-0.14	-0.29	-0.22	0.17	-0.22	-0.63	-0.93 * *	0.05	-0.59
	RMI	0.81 * *	-0.41	-0.73 *	-0.53	-0.72 *	0.07	-0.38	-0.45	-0.17	-0.39
	As	0.63	-0.43	-0.60	-0.58	-0.58	-0.08	-0.62	-0.74 *	-0.09	-0.61

注: * 表示 $P<0.05$; * * 表示 $P<0.01$ 。

3 讨论

土壤团聚体稳定性受土地利用方式、母质类型、理化性质、土层部位、气候地理条件、植被覆盖等内外因素影响。土壤质地、有机质与氧化物等内部因素决定了团聚体稳定性,而土地利用方式、母质类型及土层部位等外部因素对其含量有重要影响。

湿筛法是最为常见的团聚体稳定性测定方法,本研究表明,在相似的土地利用条件下,石灰土的团聚体稳定性总是高于第四纪红黏土和砂页岩赤红壤。这主要是因为石灰土有机质、游离氧化物和黏粒含量较高,土壤结构稳定。第四纪红黏土虽然有机质和氧化物含量略低于石灰土,但其黏粒含量高,团聚体结构较为稳定。砂页岩赤红壤 0—20 cm 土层团聚体稳定性较好,但与下层土壤稳定性差异较大。随着土层深度增加,3 种土壤的团聚体稳定性均呈现下降趋势。表层土壤根系发达,枯落物较多,受有机质影响较大。而底层土壤中有有机质含量相对较低,因此团聚体稳定性受到土壤质地和氧化物的影响更大。不同母质发育土壤的质地存在显著差异,相比较而言,底层土壤更易受到成土母质的影响。在所有供试土壤中,第四纪红黏土 40—60 cm 土层的团聚体稳定性最弱,原因可能是其有机质含量最少。砂页岩赤红壤的团聚体稳定性最差,这是因为砂页岩发育的赤红壤虽然有机质含量较高,但其黏粒含量过低,土壤结构性差。石灰土有机质含量低于砂页岩土,但其黏粒和游离氧化铁含量较高,所以团聚

体稳定性更强。在有机质含量较低的土壤中,团聚体的形成主要靠黏粒的内聚力和铁铝氧化物的胶结作用,这与已有研究^[19-20]结论一致。

经过 LB 法 3 种处理方式后,3 种土壤团聚体 MWD 值大致表现为慢速湿润处理>预湿润振荡处理>快速湿润处理,说明这 3 种土壤团聚体破碎的主要原因是快速湿润使得封闭气体爆破从而产生的消散作用。当土壤团聚体快速湿润时,水分对土壤空隙间空气有挤压作用土壤内气体压强变大,超出土壤团聚体承载的极限。与此同时,水分渗透进入,土粒间胶结作用减弱,导致团聚体发生破裂。样地位于南亚热带地区,夏季的集中性降雨加剧了地表冲蚀、水土流失等灾害。快速湿润处理正是模拟了土壤团聚体在降雨时封闭气体爆破产生的破坏机制。本研究表明,暴雨和灌溉是该地区土壤团聚体破碎的主要影响因素,而小雨和滴灌对土壤破坏作用较小,这一结果与陈正发等^[21]的研究结论一致。不同母质土壤团聚体对不同破碎机制敏感程度存在差异,砂页岩母质发育赤红壤对消散作用和机械破碎作用的敏感程度最高,而第四纪红黏土对消散作用的敏感程度更高,石灰土则对机械破坏作用的敏感程度更高。且 3 种处理方式下,表层土壤稳定性均强于下层土壤,这与汪三树等^[22]得出的结论一致。

从土壤理化性质与团聚体稳定性参数的相关性分析结果可知,土壤质地和胶结物质的种类数量(有

机质、氧化物等)对土壤团聚体的形成和稳定尤为重要。而土地利用方式、母质类型及土层部位对它们的含量有重要影响。不同的土地利用方式下土壤含水量、有机物输送和人为干扰存在差异,同时土地利用方式也会影响到有机物和氧化物质的积累与转化,进一步影响团聚体胶结状况。但土地利用方式对土壤性质的影响主要作用于表层土壤,而对底层土壤影响有限。团聚体稳定性主要受黏土矿物、有机质及铁铝氧化物等内部因素影响。不同母质发育的土壤,影响团聚体稳定性的主导因素也不同。本研究的供试土样均来源于亚热带季风区湿热多雨地带,该地区雨热同期,土壤淋溶风化作用较强,团聚体稳定性影响因素与温带地区土壤明显不同。有机质在团聚体内的作用取决于其含量高低及土壤类型,已有研究^[23]表明,在高度风化、以 1:1 型黏粒矿物为主的可变电荷土壤中,团聚体形成主要依靠氧化物的胶结作用。铁铝氧化物通过表面库伦力与黏粒相结合,形成稳定的团聚体结构,也是团聚体重要的胶结物质。也有研究^[9]认为,>1 mm 水稳性大团聚体的形成与有机质含量密切相关,但在有机质含量较低的土壤中,小粒径水稳性团聚体(1~0.5,0.5~0.25 mm)的形成由无机胶体的数量决定。绝大部分有机质分布在表层土体的水稳性大团聚体中,有机质促进了团聚体的形成,同时良好的土壤结构有利于有机物积累。此外,地表植被可以一定程度上拦截雨水,减少雨滴对土壤的直接溅蚀,从而保存大团聚体含量。随着土层加深团聚体胶结物质减少,团聚体稳定性减弱^[24]。相对于表层土壤,底层土壤的有机质和氧化物含量较少,团聚体稳定性受土壤质地影响较大,所以不同母质土壤底层团聚体稳定性差异更显著。本研究表明,南亚热带地区遭遇连续性暴雨或强灌溉时,团聚体易发生破碎,从而导致水土流失,农田生产力减弱。因此,应加强对该地区的水土保持措施以应对季节性暴雨带来的坡面侵蚀,从而缩短泥浆浸润过程,增强坡面土壤稳定性。

4 结论

(1)随着土层深度增加,3 种母质发育的土壤容重均呈上升趋势,孔隙度、有机质和游离氧化铁含量呈下降趋势。其中,砂页岩赤红壤有机质含量最高,为 22.44~42.97 g/kg,石灰土游离氧化铁含量最高,为 7.00~11.71 g/kg。石灰土和第四纪红黏土以黏粒和粉粒为主,砂页岩赤红壤以砂粒为主。从相关性分析结果可知,团聚体稳定性与土层黏粒、有机质、游离态铁铝含量关系密切。

(2)经湿筛法处理后,3 种土壤>0.25 mm 水稳性团聚体含量均在 76.45%以上,说明 3 种土壤结构稳定。其中,石灰土的水稳性团聚体含量最高,为 91.58%~92.31%;砂页岩赤红壤水稳性团聚体含量最低,为 79.18%~86.67%;且 3 种土壤团聚体的稳定性都随着土层深度的增加而减弱。

(3)LB 法 3 种处理后,3 种土壤团聚体 MWD 值大致表现为慢速湿润处理>预湿润振荡处理>快速湿润处理,说明这 3 种土壤团聚体破碎的主要原因是快速湿润使得封闭气体爆破从而产生的消散作用。第四纪红黏土对消散作用敏感度较高,为 0.48~0.79;砂页岩赤红壤对机械破碎作用敏感度较高,为 0.12~0.42。

参考文献:

- [1] Duan L X, Huang M B, Zhang L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537:356-366.
- [2] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. *生态学报*, 2018, 38(5):1590-1599.
- [3] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3):415-421.
- [4] Erktan A, Cécillon L, Graf F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2):121-137.
- [5] 苏静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5):114-117.
- [6] 闫峰陵,史志华,蔡崇法,等.红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4):577-583.
- [7] 金万鹏,范昊明,刘博,等.冻融交替对黑土团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12):4195-4201.
- [8] 张池,高云华,陈旭飞,等.不同土地利用方式对赤红壤理化性质的综合影响[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(12):2140-2149.
- [9] 罗友进,赵光,高明,等.不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6):117-122.
- [10] Tazikeh H, Khormali F, Amini A, et al. Soil-parent material relationship in a mountainous arid area of Kopet Dag basin, North East Iran[J]. *Catena*, 2017, 152:252-267.
- [11] 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.
- [12] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China) [J]. *Geoderma*, 2013, 209/210(1):75-85.

effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J].*Science of the Total Environment*,2020,703:e134617.

[8] Guo L K, Shen J, Li B, et al. Impacts of agricultural land use change on soil aggregate stability and physical protection of organic C[J].*Science of the Total Environment*,2020,707:e136049.

[9] 魏守才,谢文军,夏江宝,等.盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展[J].*应用生态学报*,2021,32(1):369-376.

[10] 吴梦瑶,陈林,庞丹波,等.贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J].*水土保持学报*,2021,35(2):210-216.

[11] 朱元皓,黄云,盛储望,等.赣南经济林种植对土壤团聚体及有机碳的影响[J].*环境科学与技术*,2020,43(5):213-220.

[12] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J].*水土保持研究*,2018,25(1):84-91.

[13] 张强,周正朝,姚小萌.植被恢复过程中土壤团聚体分形特征研究[J].*河南科学*,2017,35(1):94-100.

[14] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J].*水土保持研究*,2021,28(1):25-30.

[15] 雷蕾,谢新生,雷庆.浅谈大桥水库主坝坝体变形反演分析[J].*地下水*,2017,39(6):104-105.

[16] 鲍玉海,郭丰,胡保生,等.西南干旱河谷区水库消落带柳树造林效果评价[J].*水土保持研究*,2018,25(5):216-219.

[17] 封磊,洪伟,吴承祯,等.杉木—观光木混交林不同经营模式土壤团粒结构的分形特征[J].*山地学报*,2004,22(3):315-320.

[18] 陈正发,史东梅,谢均强,等.紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J].*中国农业科学*,2011,44(13):2721-2729.

[19] He X B, Bao Y H, Nan H W, et al. Tillage pedogenesis of purple soils in southwestern China[J].*Journal of Mountain Science*,2009,6(2):205-210.

[20] 陆铸畴,包忻怡,Liu X,等.应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性[J].*灌溉排水学报*,2018,37(5):115-120.

[21] 邬静淳,欧阳,熊兴政,等.三峡库区消落带 2 种树木林下土壤的物理性质比较[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2017,45(4):157-164.

[22] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带土壤团聚体微结构变化特征[J].*山地学报*,2020,38(3):360-370.

[23] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].*土壤学报*,2008,45(5):802-809.

[24] 丁文峰,李占斌.土壤抗蚀性的研究动态[J].*水土保持科技情报*,2001(1):36-39.

[25] 区晓琳,陈志彪,姜超,等.植被恢复对亚热带侵蚀红壤团聚体养分分布的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(6):230-238.

(上接第 86 页)

[13] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].*生态学报*,2016,36(8):2264-2273.

[14] 刘警鉴,卢远,刘斌涛,等.广西壮族自治区土地利用与土壤侵蚀的关系[J].*水土保持通报*,2018,38(1):41-46.

[15] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J].*Journal of the American Society of Agronomy*,1936,28(5):337-351.

[16] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J].*European Journal of Soil Science*,1996,47(4):425-437.

[17] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].*农业工程学报*,2009,25(3):37-41.

[18] 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.

[19] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J].*土壤学报*,1997,34(4):359-366.

[20] 侯春霞,骆东奇,谢德体,等.不同利用方式对紫色土团聚体形成的影响[J].*西南农业大学学报(自然科学版)*,2003,25(5):467-470.

[21] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].*水土保持学报*,2011,25(4):6-11.

[22] 汪三树,黄先智,史东梅,等.基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究[J].*生态学报*,2013,33(18):5589-5598.

[23] Denef K, Six J. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy[J].*European Journal of Soil Science*,2010,57(6):774-786.

[24] 谢贤健,张继.巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].*水土保持学报*,2012,26(6):175-179.