花岗岩侵蚀劣地不同种植年限果园土壤团聚体的稳定性

林 哲[1], 黄智刚[1,2], 邓羽松[3], 黄婉霞[3], 蒋代华[1], 王 玲[4]

(1.广西大学 农学院, 广西 南宁 530004; 2.中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3.广西大学 林学院, 南宁 530004; 4.华中农业大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: [目的] 对花岗岩侵蚀劣地不同种植年限果园土壤团聚体稳定性进行研究,为南方花岗岩丘陵区侵蚀劣地的综合治理工作提供科学参考。[方法] 以桂东南花岗岩丘陵区柑橘园土壤为研究对象,运用 Le Bissonnais(LB)法测定了侵蚀区不同种植年限(0,3,7,12,16,21 a)果园土壤团聚体组成及其稳定性,探究团聚体稳定性随种植年限的变化趋势及其影响因素。[结果] ①随着种植年限的延长,土壤通透性改善,阳离子交换量、有机碳含量提高,细颗粒物质含量上升,土壤质地由砂质土逐步向壤质土转化。②在 LB 法 3 种处理下,>0.25 mm粒径的团聚体质量百分数均随着种植年限的增加而增加,到 21 a 时均达到了65.68%以上,较对照(0 a)增加 9.18%,土壤团聚度升高。③土壤团聚体平均重量直径(MWD)随着种植年限延长显著提高,且相对消散指数(RSI),机械破碎指数(RMI)及可蚀性因子 K 值均有不同程度的下降,表明团聚体稳定性得到提高。④团聚体 MWD 与土壤有机碳含量、黏粒含量为极显著正相关关系,与阳离子交换显著正相关,与砂粒含量极显著负相关,表明土壤中有机碳、黏粒以及阳离子交换量的提高均可以显著提高团聚体稳定性;有机碳含量是影响团聚体稳定性的主要影响因素。[结论] 削坡开梯开垦柑橘园可以有效治理侵蚀劣地,且随着开垦年限的增加,土壤的结构趋于稳定,团聚体稳定性提高,土壤质量改善。

关键词: 种植年限; 团聚体稳定性; LeBissonnais 法; 通径分析

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)04-0069-08 **中图分类号**: S157

文献参数: 林哲, 黄智刚, 邓羽松, 等.花岗岩侵蚀劣地不同种植年限果园土壤团聚体的稳定性[J].水土保持通报,2021,41(4):69-76.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.010; Lin Zhe, Huang Zhigang, Deng Yusong, et al. Stability of soil aggregate in orchards with different planting years in granite eroded poor area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):69-76.

Stability of Soil Aggregate in Orchards with Different Planting Years in Granite Eroded Poor Area

Lin Zhe[1], Huang Zhigang[1,2], Deng Yusong[3], Huang Wanxia[3], Jiang Daihua[1], Wang Ling[4]

(1.*College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi* 530004, *China*; 2.*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; 3.*College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi* 530004, *China*; 4.*College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei* 430070, *China*)

Abstract: [Objective] The stability of soil aggregate in orchard with different planting years in granite eroded poor land was studied to provide scientific reference for comprehensive management of eroded poor land in granite hilly area of South China. [Methods] The composition and stability of soil aggregate in orchards with different planting years (0, 3, 7, 12, 16, 21 years) in eroded area were determined by using Le bissonnais (LB) method in granite hilly area of Southeast Guangxi Zhuang Autonomous Region, and to explore the variation trend of soil aggregate stability with planting years and its influencing factors. [Results] ① With the increase of planting years, soil permeability was improved, cation exchange content, organic carbon content and fine particulate matter content increased, and the soil texture gradually transformed from sandy

收稿日期:2021-04-10 **修回日期**:2021-05-08

资助项目:国家重点研发计划项目"侵蚀退化红壤肥力提升与生态功能定向调控技术"(2017YFC0505402); 广西科技重大专项"集约化农区面源污染综合防控体系与示范"(桂科 AA17204078-4); 国家自然科学基金重点项目(41630858)

第一作者:林哲(1997—),男(汉族),广西壮族自治区玉林市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email:linzhe9707@163.com。

通讯作者:黄智刚(1971—),男(汉族),广西壮族自治区德保县人,博士,副教授,主要从事农业面源污染方面的研究。Email:hzg@gxu.edu.cn。

soil to loam soil. ② Under three different LB methods, the soil aggregate mass percentage of >0.25 mm size increased with the prolongation of planting years, reached more than 65.68% at 21 years, which was 9.18% higher than that of control. ③ The mean weight diameter (WMD) of soil aggregate increased significantly with the prolongation of the planting years. And the RSI, RMI, and k values all decreased to different degrees, meaning that the aggregate stability was improved. ④ The MWD was extremely significantly positively related to soil organic carbon content and clay content. Cation exchange content was significantly positively related to MWD, and sand content was extremely significantly negatively correlated. This showed that the increase of organic carbon, clay and cation exchange content could significantly improved the soil aggregate stability. The content of organic carbon was the main factor affecting the stability of aggregates. [Conclusion] Cutting slope to form citrus orchard can effectively control eroded poor land, and with the prolongation of reclamation years, the soil structure tends to be stable, and then the aggregate stability and the soil quality are improved.

Keywords: planting years; soil aggregate stability; Le Bissonnais; path analysis

团聚体是土壤结构的基本单位,其含量和稳定性不仅作为评价土壤抗蚀性的重要指标,而且能反映土壤的结构性质,影响土壤质量[1]。由土壤侵蚀而形成的大面积贫瘠化且难以利用的土地,被称为侵蚀劣地[2]。研究[4]表明,侵蚀劣地的土壤团聚体不断退化,团聚状况和团聚度变低,大团聚体数量剧减[3]。而侵蚀劣地的治理关键在于提高土壤团聚体稳定性,改良土壤肥力,降低可蚀性。Rabbi 等[5]提出,使团聚体粘结在一起的碳源主要来自于土壤有机质的分解,促进了水稳性团聚体的形成。随着土壤的熟化进程,土壤中团聚体数量及稳定性均会提高。不同地区探索将水土流失工程治理与农业措施相结合的模式,即通过种植经济作物来改善土壤的状况[6]。但根据裴中健等[7]对栽培作物的相关研究,在栽培初期土壤中的有机质并未对土壤团聚体的形成和稳定性有帮助,>0.25 mm 的团聚体数量较低,土壤整体稳定性也较差;而随着种植年限的延长,>0.25 mm 团聚体的数量及稳定性明显提高。而成艳红等[8]的研究则表明,作物种植能增加大团聚体的含量以及降低土壤对其的破坏率,且年限越长效果越突出。同时有研究[9-10]表明,过长的种植年限不利于土壤团聚的稳定性。虽然研究得出的结论各不相同,但均说明栽培作物可以改善土壤结构,且受种植年限的影响。He 等[11]提出了在土地恢复中应根据植物对土壤的保护能力来合理选择所需植物。Liu 等[12]开展了对不同肥力下果园、旱地、水稻土以及草地土壤状况的研究,结果显示果园土壤中不同粒级团聚体有机碳显著高于其他土地利用类型。Liu 等[13]通过对比农田和果园土壤状况得出结论,果园土壤团聚体稳定性和有机碳含量均高于农田。除此之外,Spohn 等[14]进一步发现土地利用方式转变后,土壤水稳性团聚体以及有机碳等会以不同的速率随之变化,然后达到新的平衡。

桂东南地区分布着大量的花岗岩,花岗岩发育的丘陵区是面蚀、沟蚀及崩岗侵蚀发生的主要区域,水土流失严重,产生大面积侵蚀区[15]。坡改梯是治理侵蚀劣地一项重要有效的措施,在闽南土壤侵蚀区早已开始实行[16]。众多试验亦证明该措施可以改进土壤理化性状,有效提高水土保持效应,适合在我国南方的红壤坡地大力推广[17]。王书玲[18]进一步研究发现,削坡开梯不仅可以保水保土保肥,而且土壤结构随种植年限的延长不断改善,土壤综合肥力质量评价显著高于未进行坡改梯的侵蚀劣地;对比整治品种结果表明,柑橘是一种适应侵蚀劣地的品种,整治效果较优。邓羽松等[19]同样证实在崩岗削坡开梯种植柑橘后,土壤结构随着种植年限延长得到有效改善。开垦柑橘园治理侵蚀劣地是一种将生态和经济相结合的治理模式,对地区发展有着重要意义。因此,选取广西壮族自治区梧州市龙圩区侵蚀劣地上不同种植年限的柑橘园土壤为研究对象,基于 Le Bissonnais (LB)法探究土壤团聚体稳定性状况,分析土壤的抗蚀性指标,结合研究土壤各理化性质,揭示土壤团聚体组成及稳定性随种植年限的变化规律及其主要影响因素,以期为南方花岗岩丘陵区侵蚀劣地的综合治理提供参考。

1 材料方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区梧州市龙圩区,地处浔江南岸(111°25′—111°40′E,23°26′—24°10′N),属南亚热带季风气候,气候温和,雨热同季。年均气温 21.2 ℃,年无霜期 323 d,年均降雨量 1 520 mm,年均

相对湿度达到 80%,年均日照时数 1 815.2 h。研究区是典型的花岗岩发育区,主要土壤类型为赤红壤。由于雨量充沛以及花岗岩的母质特征,土层深厚、疏松的红壤极易被雨水冲刷造成水土流失,土壤侵蚀严重,是崩岗发育的集中区域,产生大面积侵蚀劣地。该区农业种植主要以柑橘、蔬菜和水稻为主,其中柑橘为主要经济作物之一。优势植被为松科(*Pinaceae*)、樟科(*Lauraceae*)等乔木,桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、柃木(*Eurya japonica*)等灌木,以及铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、野古草(*Arundinella anomala*)等草本[20]。

1.2　样品采集

于 2018 年 3 月分别选择在侵蚀劣地上开垦的不同年限(0,3,7,12,16,21 a)的柑橘园作为典型样地,其中 0 a 为新开垦的柑橘园。所选柑橘园地形地貌、土壤类型、果树品种、使用背景及采取的农业措施基本一致。具体选择 3 个有代表性的样地(5 m×5 m),样地内柑橘长势良好,无明显其他干扰,为防止边界效应,样方之间距离超过 50 m。清除地表杂物后,在每个样地按照 S 形样线采集土层深度为 0—20 cm 及 20—40 cm 的原状土带回室内,期间尽量保持原状土结构,带回室内后将同一土层的土样混合在一起后采用四分法取混合样。待土样进行自然风干后,剔除石子和植物根系等杂质待测。用环刀采集不同土层的土样测定土壤容重及孔隙度等。

1.3　测定方法

土壤理化性质按照常规方法测定。pH 值采用电位计法测定;容重及孔隙度采用环刀法测定[21];有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤机械组成采用吸管法测定;阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定。运用干筛法选取 3～5 mm 团聚体,于 40 ℃烘箱内烘 24 h,将初始含水量统一。运用 LB 的 3 种处理方法来模拟不同湿润条件(暴雨、小雨、机械扰动)对土壤团聚体的破坏机理,分别是快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)、预湿后扰动(WS),然后将上述 3 种处理后的团聚体洗入已浸泡在乙醇中的套筛内(筛孔从大到小依次为 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 mm),过筛后将各筛上的团聚体收集并于 40 ℃烘干 48 h 后,称量,精确至 0.000 1 g,具体操作见文献[22]。

1.4　数据处理

(1) 团聚体平均重量直径(MWD,mm)。计算公式为:

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}X_iW_i \tag{1}$$

式中:X_i 为每个粒级下的团聚体平均直径(mm);W_i 为每个粒级下的团聚体质量百分比。

(2) 相对消散指数 RSI 及相对机械破碎指数 RMI:

$$\mathrm{RSI}=\frac{\mathrm{MWD_{SW}}-\mathrm{MWD_{FW}}}{\mathrm{MWD_{SW}}} \tag{2}$$

$$\mathrm{RMI}=\frac{\mathrm{MWD_{SW}}-\mathrm{MWD_{WS}}}{\mathrm{MWD_{SW}}} \tag{3}$$

式中:$\mathrm{MWD_{FW}}$,$\mathrm{MWD_{WS}}$,$\mathrm{MWD_{SW}}$ 分别为 3 种处理〔快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)、预湿后扰动(WS)〕的团聚体平均重量直径。

(3) 可蚀性因子 K 值(只考虑几何粒径):

$$K=7.954\{0.001\ 7+0.049\ 4\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg(\mathrm{GMD})+1.675}{0.698\ 6}\right)^2\right]\} \tag{4}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp[\sum X_iW_i/m]$$

式中:GMD 表示土壤团聚体几何平均直径(mm);X_i 为每个粒级下的团聚体平均直径(mm);W_i 为对应 X_i 的土壤团聚体占总团聚体的百分含量;m 为样本总重量(g)。

1.5　数据分析

数据的整理和作图用 Excel 2010 软件进行,统计分析用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件进行,采用单因素方差分析和最小差异法进行差异显著性检验(LSD, $p<0.05$)。

2　结果与分析

2.1　不同种植年限土壤的理化性质

不同种植年限土壤基本的物理化学性质详见表 1。由表 1 可得,随着种植年限的延长,容重降低,孔隙状况得到改善,表现为总孔隙度及非毛管孔隙度增加,土壤通透性提高。pH 值未呈现出规律性的变化,在 0—20 cm 土层的变化范围为 4.49～4.66,在 20—40 cm 则为 4.48～4.62。随种植年限延长,阳离子交换量及有机碳含量显著提高,这说明土壤的保肥供肥能力和缓冲能力得到了显著的提高。种植 0 a 的土壤主要以砂粒和粉粒为主,砂粒所占比例 35.56%～36.20%,粉粒所占比例 35.72%～39.42%,黏粒仅为 25.03%～28.08%,随着种植年限的延长,砂粒和粉粒所占比例降低,黏粒所占比例提高,21 a 时黏粒所占比例达到最高,为 30.41%～34.95%,此时砂粒、粉粒所占比例分别降至 31.26%～33.87%,33.79%～35.72%,明显看出砂粒的降低幅度更大,这说明土壤质地得到了有效的改善,由砂质土向壤质土发展。

表 1 不同种植年限土壤基本的物理化学性质

种植年限/a	土层/cm	有机碳/(g·kg^{-1})	阳离子交换量/(cmol·kg^{-1})	pH 值	土粒密度/(g·cm^{-3})	容重/(g·cm^{-3})	总孔隙/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
0	0—20	2.30±0.08^{e}	7.30±0.21^{e}	4.56±0.06^{abc}	2.66±0.03^{a}	1.24±0.05^{a}	53.53±2.26^{b}	42.50±0.74^{a}	11.03±3.00^{a}	25.03±1.45^{d}	39.42±2.64^{a}	35.56±1.20^{a}
	20—40	2.82±0.57^{c}	6.77±0.16^{c}	4.54±0.01^{b}	2.68±0.01^{ab}	1.29±0.04^{a}	52.00±1.36^{a}	43.20±1.99^{a}	8.80±0.63^{b}	28.08±2.47^{a}	35.72±2.42^{a}	36.20±0.06^{a}
3	0—20	6.07±0.89^{d}	7.92±0.19^{de}	4.63±0.04^{ab}	2.65±0.01^{a}	1.20±0.03^{ab}	54.73±0.97^{ab}	41.81±1.85^{a}	12.92±0.88^{a}	25.99±3.21^{cd}	37.99±2.73^{a}	36.02±0.48^{a}
	20—40	4.24±1.07^{c}	5.03±0.53^{e}	4.58±0.03^{ab}	2.70±0.02^{a}	1.25±0.03^{a}	53.58±1.49^{a}	45.59±2.28^{a}	7.99±0.78^{b}	27.04±0.71^{a}	37.59±2.22^{a}	35.38±2.93^{a}
7	0—20	10.26±1.27^{c}	9.15±0.71^{cd}	4.53±0.01^{bc}	2.64±0.05^{ab}	1.19±0.01^{ab}	54.98±0.52^{ab}	42.01±1.61^{a}	12.97±1.09^{a}	29.37±0.71^{bcd}	36.42±2.84^{a}	34.21±3.55^{ab}
	20—40	6.76±1.10^{b}	5.88±0.21^{d}	4.48±0.03^{c}	2.62±0.01^{b}	1.23±0.02^{a}	53.14±0.68^{a}	44.66±2.03^{a}	8.49±1.35^{b}	28.16±1.05^{a}	36.75±1.87^{a}	35.10±0.83^{a}
12	0—20	16.63±0.47^{b}	9.90±0.42^{c}	4.66±0.06^{a}	2.61±0.01^{ab}	1.15±0.02^{b}	56.06±0.62^{ab}	40.81±2.58^{a}	15.25±1.97^{a}	30.34±1.85^{abc}	36.69±1.22^{a}	32.99±0.63^{abc}
	20—40	8.37±0.25^{b}	7.67±0.19^{b}	4.62±0.01^{a}	2.65±0.03^{ab}	1.21±0.02^{a}	54.49±1.20^{a}	45.78±1.22^{a}	8.72±0.02^{b}	29.15±0.29^{a}	36.67±1.82^{a}	34.20±1.53^{a}
16	0—20	17.67±1.32^{b}	12.01±0.18^{b}	4.53±0.03^{bc}	2.56±0.04^{b}	1.16±0.03^{ab}	54.74±0.25^{ab}	38.78±0.97^{a}	15.97±0.71^{a}	32.26±0.14^{ab}	37.69±1.00^{a}	30.05±0.85^{c}
	20—40	10.65±0.06^{a}	7.98±0.25^{b}	4.55±0.01^{b}	2.63±0.04^{b}	1.22±0.04^{a}	53.64±1.80^{a}	43.11±0.22^{a}	10.54±2.02^{ab}	28.81±2.18^{a}	37.19±0.35^{a}	34.01±2.53^{a}
21	0—20	21.39±0.55^{a}	16.22±1.32^{a}	4.49±0.04^{c}	2.62±0.03^{ab}	1.14±0.04^{b}	56.63±0.78^{a}	41.87±3.15^{a}	14.76±3.93^{a}	34.96±1.90^{a}	33.79±1.80^{a}	31.26±0.11^{bc}
	20—40	11.15±0.22^{a}	9.09±0.41^{a}	4.62±0.01^{a}	2.66±0.01^{ab}	1.25±0.08^{a}	53.07±2.81^{a}	40.68±2.97^{a}	12.39±0.16^{a}	30.42±0.94^{a}	35.72±0.88^{a}	33.87±1.82^{a}

注:数值为平均值±标准差;小写字母表示不同种植年限间土壤理化性质的差异显著性($p<0.05$)。

2.2 种植年限对土壤团聚体粒径分布特征的影响

据土壤物理学原理,团聚体崩解主要是由于消散、膨胀和机械扰动造成的,这分别对应了 LB 法的 FW,SW 以及 WS 这 3 种处理。结合图 1—3 看出,不同土层间的水稳性团聚体粒径分布并未体现出较大差异。随着种植年限的延长,3 种处理下大粒径的团聚体质量分数均得到提高。其中 FW 处理下,优势团聚体由 0.5~0.2 mm 团聚体转变为以>2 mm 团聚体,21 a 时>0.25 mm 的团聚体质量分数较 0 a 提高了 19.05%。WS 处理下,主要体现为 0.5~0.2 mm 团聚体逐渐团聚为>2 mm 的大团聚体,21 a 时>0.25 mm 团聚体质量百分数较 0 a 提高了 9.18%。SW 处理下,21 a 时>0.25 mm 团聚体质量百分数较 0 a 提高了 9.40%。

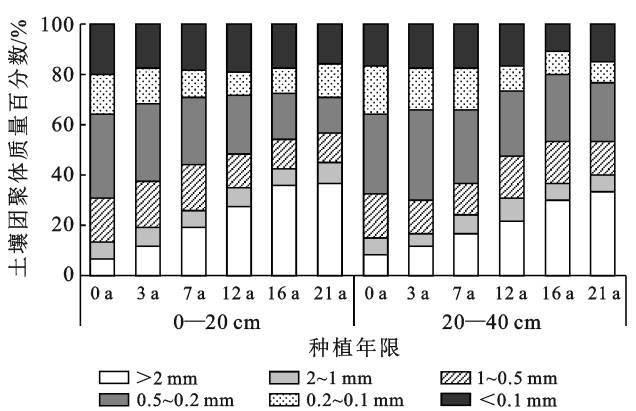


图 1 快速湿润(FW)处理下不同种植年限土壤团聚体粒径分布

2.3 种植年限对土壤团聚体稳定性特征的影响

MWD 是评价团聚体稳定性的一个重要指标,MWD 值越大表示土壤团聚体的聚集程度越大,土壤稳定性越好。由图 4 可知,3 种不同处理的 MWD 值在不同种植年限下差异显著。其中,FW 处理下不同种植年限间的 MWD 差异最为显著,其次是 WS 处理,差异最小的是 SW 处理。除 FW 处理下 7,12,16 a时 0—20 cm 土层 MWD 值显著高于 20—40 cm 外,其余各处理的土层间 MWD 均无显著性差异。随着种植年限的延长而 MWD 不断增加,在 21 a 时达到最大,较之 0 a,MWD_{FW} 增加了 152.38%,MWD_{WS} 增加了 58.17%,MWD_{SW} 增加了 41.27%。这表明随着种植年限的延长,团聚体稳定性显著提升。

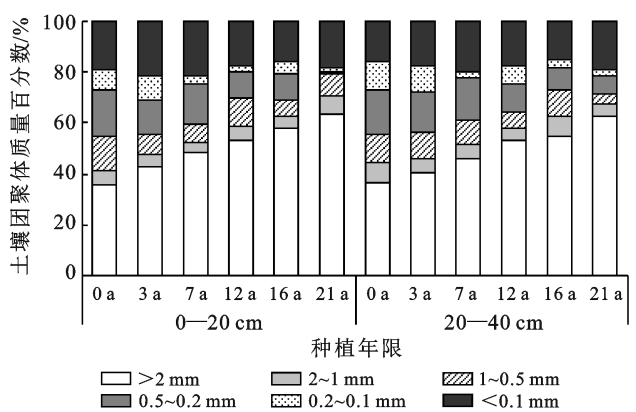


图 2 预湿后扰动(WS)处理下不同种植年限土壤团聚体粒径分布

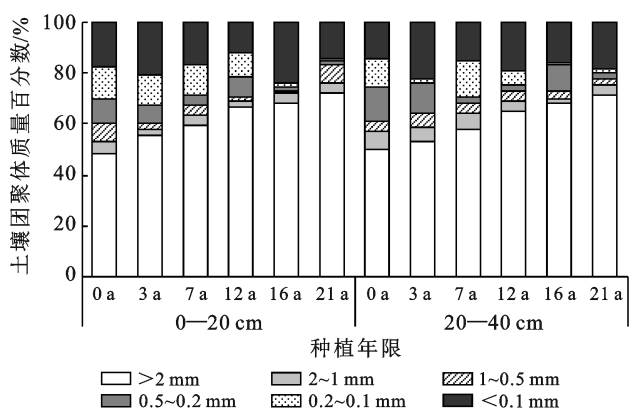
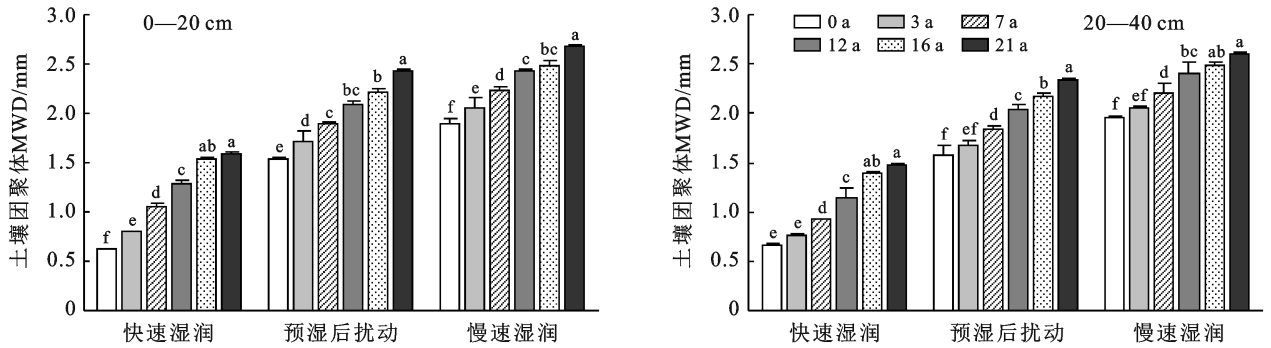


图 3 慢速湿润(SW)处理下不同种植年限土壤团聚体粒径分布



注:小写字母表示不同种植年限间土壤理化性质的差异显著性($p<0.05$)。下同。

图 4　不同种植年限下土壤团聚体稳定性

RSI,RMI 可以作为反映不同种植年限下土壤团聚体对不同破碎机制敏感性程度的指标,数值越大,敏感程度越高。其中 RSI 可以衡量消散作用,RMI 衡量机械破碎作用。根据图 5 可知,随着土层加深团聚体对破碎机制的敏感度提高。随着种植年限延长至 21 a,RSI 及 RMI 均显著降低,0—20 cm 土层中 21 a 的 RSI 值较 0 a 降低了 40.30%,RMI 值降低了 52.63%;而 20—40 cm 土层的 RSI 值降低了 34.85%,RMI 值降低了 47.37%,这说明机械破碎对团聚体影响降低,稳定性上升。

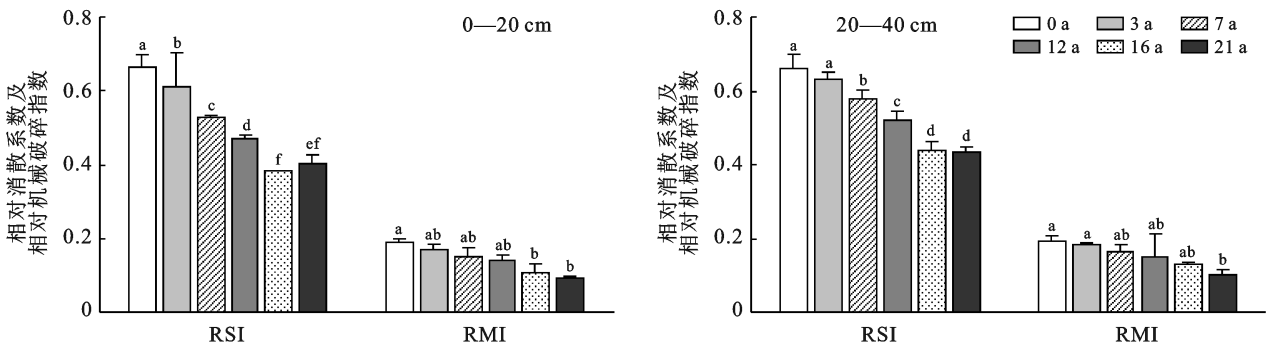


图 5　不同种植年限下土壤团聚体相对消散系数(RSI)及相对机械破碎系数(RMI)变化

K 值可反映出土壤抵抗侵蚀能力的大小,K 值越小土壤抗蚀性越强。根据图 6,3 种处理 20—40 cm 土壤 K 值要略高于 0—20 cm,但并不明显,说明土层深度对土壤抗蚀性无太大影响。

FW 处理下,0 a 的 K 值变化范围在 0.031 7～0.032 0,而 21 a 的变化幅度为 0.027 1～0.027 6;WS 处理下 0 a 的 K 值变化幅度则为 0.027 1～0.027 3,21 a 的变化幅度为0.023 9～0.024 0;SW 处理下 0 a 的 K 值在 0.025 5～0.025 8 之间变化,而在 21 a 下于 0.023 0～0.023 2 之间浮动。整体来看,随着种植年限的延长,K 值显著减小,这表明土壤可蚀性降低,抗蚀能力加强。

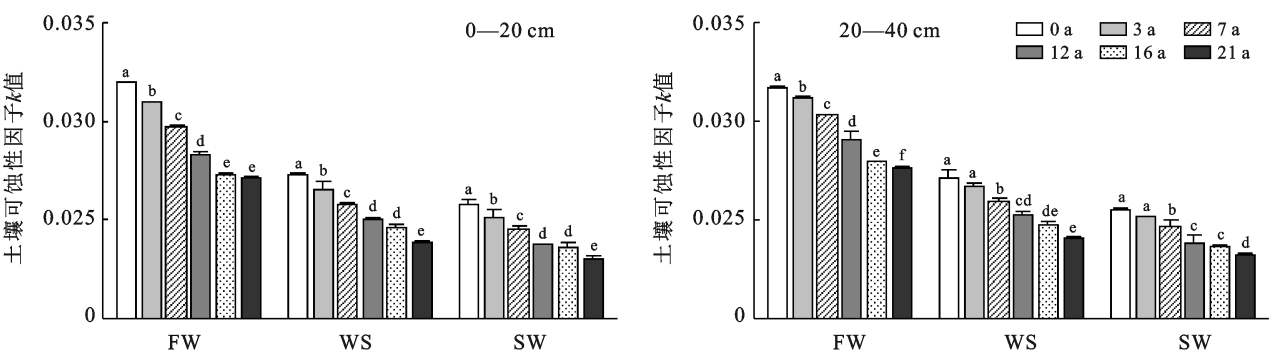


图 6　不同种植年限下土壤可蚀性因子 K 值变化

2.4 影响土壤团聚体的因素

土壤团聚体稳定性受到诸多因素的影响，对MWD与土壤中可能的影响因子进行相关性分析(表2)。由表2可以看出，3种处理下均与MWD极显著相关的指标包括有机碳、砂粒、黏粒，其中除砂粒与MWD为极显著负相关外，其余均为极显著正相关。阳离子交换量与MWD显著正相关，容重和土粒密度仅在FW处理下与MWD显著负相关。

表2 土壤团聚体稳定性指标MWD与影响因子的相关性分析

指 标	MWD_{FW}	MWD_{WS}	MWD_{SW}
容 重	−0.61*	−0.56	−0.55
阳离子交换量	0.75**	0.74**	0.70*
总孔隙度	0.49	0.46	0.45
有机碳含量	0.91**	0.88**	0.87**
土粒密度	−0.66*	−0.56	−0.55
砂 粒	−0.86**	−0.81**	−0.79**
粉 粒	−0.50	−0.57	−0.57
黏 粒	0.87**	0.87**	0.86**

注：* 表示检验相关性显著($p<0.05$)，** 表示检验相关性极显著($p<0.01$)。

将不同处理下的MWD值作为因变量，把上述所有影响因子作为自变量，进行多元回归分析，排除其他因子后，剩下的因子分别为有机碳含量以及容重，然后分别得出以下不同试验处理的标准化方程：

$$FW: Y=-4.625+0.77X_1+4.118X_2$$

$$WS: Y=-3.700+0.68X_1+4.128X_2$$

$$SW: Y=-2.558+0.58X_1+3.535X_2$$

式中：Y 为标准化的MWD值；X_1 为有机碳含量；X_2 为容重。

MWD是反映团聚体稳定性的重要指标，将其与各影响因子进行通径分析，即将影响因子对MWD的作用分为直接影响作用和通过其他因子产生的间接影响作用，体现在简单相关性系数分解成的直接通径系数及间接通径系数。由表3可以看出，在FW处理下，对MWD值有主要影响的两个因子，分别为有机碳含量以及容重。有机碳含量的直接通径系数达到了1.34，且将间接通径系数合计的负数抵消，使得简单相关系数转为正数，说明其对MWD有强烈的直接效应；而容重的直接通径系数虽然为0.52，但间接通径系数合计达到了−1.12，且简单相关系数也为负数，说明容重主要是通过对有机碳含量的影响从而影响MWD。从总的影响效应来看，有机碳含量＞容重，相关系数分别是0.91，−0.61。由表4—5可以看出，WS，SW处理下的情况与FW一致，均体现为土壤有机碳含量对MWD有强烈的直接影响，而容重是通过影响有机碳含量从而间接影响MWD。在WS处理下，各因素相关系数分别为0.88和−0.56，直接通径系数分别是1.38，0.60。在SW处理下，各因素相关系数分别是0.87和−0.55，直接通径系数分别为1.37，0.60。

表3 快速湿润(FW)处理下团聚体MWD影响因素的通径分析

自变量	与Y(MWD_{FW})简单相关系数	直接通径系数	间接通径系数		合 计
			X_1	X_2	
X_1	0.91	1.34		−0.43	−0.43
X_2	−0.61	0.52	−1.12		−1.12

表4 预湿后扰动(WS)处理下团聚体MWD影响因素的通径分析

自变量	与Y(MWD_{FW})简单相关系数	直接通径系数	间接通径系数		合 计
			X_1	X_2	
X_1	0.88	1.38		−0.50	−0.50
X_2	−0.56	0.60	−1.16		−1.16

表5 慢速湿润(SW)处理下团聚体MWD影响因素的通径分析

自变量	与Y(MWD_{FW})简单相关系数	直接通径系数	间接通径系数		合 计
			X_1	X_2	
X_1	0.87	1.37		−0.50	−0.50
X_2	−0.55	0.60	−1.15		−1.15

3 讨 论

本研究中，随着柑橘园种植年限的延长，土壤容重降低，孔隙度提高，土壤的通透性得到了改善，这主要是由于果树根系运动活跃且覆盖范围大，以及各种土壤微生物活动频繁，使得土壤疏松多孔。以花岗岩为母质的红壤主要以石英、长石为主，侵蚀过程中土壤表层遭到剥蚀，使得风化层土壤露出，因此机械组成以砂粒为主，经开垦后随着土壤水肥状况的改善，黏粒和粉粒含量上升，质地得到了有效的改善[19]。随种植年限延长，土壤的阳离子交换量显著提高，有机碳得到大量积累。土壤中带电的颗粒主要为土壤中的胶体，由于黏粒含量的提高，土壤变得黏重，使得土壤中胶体部分含量上升，负电荷量增加，阳离子交换量增加。果树在生长过程中产生大量的枯枝落叶，经微生物对植物残体的分解作用，在表层形成腐殖质，腐熟后向土壤输入大量有机碳，同时腐殖质作为土壤胶体的一种类型，对阳离子交换量也有一定的贡献。

团聚体稳定性的相关研究中，＞0.25 mm的团聚体含量是重要的评价指标[23]。本研究中，随着种植

年份的延长,> 0.25 mm 的水稳性团聚体数量提升,提升幅度在 14.96%以上,中小粒径团聚体转化为大团聚体(>2 mm),这与其他学者[24]研究结论基本一致,这可能是由于果园土壤的疏水性通过增加内聚力和减少分散来保护和增强土壤团聚体,进而促进形成了较大的团聚体[25]。LB 法 3 种处理下,团聚体 MWD 均随种植年限增加而显著增加,其中在 FW 处理下的变化最为明显,21 a 较 0 a MWD 增加了 152.38%,这也可以说明花岗岩侵蚀劣地土壤抵御暴雨冲刷的能力显著提高。同时,RSI,RMI 以及可蚀性因子 K 值均随着种植年限延长而降低。综合分析可以得出,土壤团聚体稳定性在随着种植年限的延长而提高,这与前人[26]得出的结论一致。但石宗琳等[9]和王义祥等[10]却认为随着种植年限的延长,土壤团聚体稳定性降低,这与本研究得出的结论不同。土壤中团聚体形成主要受到有机物质的胶结作用影响,同时伴随着生物或微生物的复合作用。在果园开垦前期,施用大量有机肥作为基肥,土壤有机碳源充足,生物多样性变得丰富[27];且果树为抵抗土壤水流分散及减小径流,在根系周边与真菌菌丝等共同作用产生粘结剂,提高水稳性团聚体数量及稳定性,随种植年限延长,土壤结构随之改善并逐渐趋于稳定[28]。而当果树树龄>25 a 时已经属于老龄果园,此时果树开始衰老,根系分泌物降低,此外果园日常管理中较多使用无机化肥,有机肥料所占比例较低,随着有机物质被微生物不断分解,土壤有机碳源降低,从而影响团聚体稳定性[29];另一方面,在降雨等因素的影响下,土壤中的自由黏粒会逐渐向下层移动,且种植年限较长的果园中通常缺乏耕作扰动,这进一步加剧了这个状况,因而导致团聚体稳定性下降[30]。因此,在实际治理过程中,应注意柑橘园园龄不宜过大,且应适当增施有机肥料或定期进行翻耕扰动。同时,可在果园中套种能够增加土壤有机碳的积累,利于提高土壤稳定性[31]。

土壤有机碳和颗粒组成及养分等均可能会对团聚体稳定性有影响[32]。有机胶结作用是团聚体形成的关键,而黏粒本身比表面较大,吸附能强,湿润条件下也可以起到黏结团聚体的作用[33]。本研究通过对团聚体稳定性指标 MWD 值与土壤理化指标进行相关性分析,得出土壤有机碳含量、黏粒表现为极显著正相关,阳离子交换量为显著正相关,砂粒为极显著负相关。通过线性通径分析,得到对 MWD 有直接影响的因素为有机碳含量以及土壤容重,3 种处理下有机碳含量对 MWD 的直接通径系数达到了 1.338 以上,而容重的间接通径系数都在−1.122 以下。这进一步证明了有机碳是影响团聚体稳定性的最重要因素之一,这与大量已有有关团聚体稳定性及研究得出的结果一致[34-35]。而容重在相关性分析中并未体现出于 MWD 的显著相关性,却在通径分析中表现出对 MWD 有影响作用,这可能是因为有机碳含量受到容重的影响,容重增大导致有机碳积累受阻,进而影响到团聚体的稳定性。

4　结 论

桂东南丘陵区的侵蚀劣地经削坡开梯改造为柑橘园后,随种植年限的延长,土壤通透性改善,阳离子交换量、有机碳含量提升,土壤质地改善。团聚体稳定性受种植年限的影响,开发年份越久,>0.25 mm 的团聚体质量分数越高,MWD 值越大,RSI,RMI,K 值越小,团聚体越稳定,21 a 时土壤团聚体稳定性最优。根据相关性分析,土壤有机碳含量、黏粒及阳离子交换量均与 MWD 值呈显著正相关,砂粒呈极显著负相关;通径分析表明,有机碳及土壤容重对 MWD 有直接影响,其中有机碳的直接作用最为强烈,而容重主要是通过对有机碳含量的影响从而间接影响 MWD,这表明有机碳是影响团聚体稳定性的关键因素。通过削坡开梯开垦柑橘园可以有效治理侵蚀劣地,且随着开垦年份的增加,土壤的结构趋于稳定,团聚体稳定性提高,抗蚀能力得到改善。

[参 考 文 献]

[1] 蓝良就,张野,黄炎和,等.退化花岗岩植被恢复对团聚体及其有机碳的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):190-194,199.

[2] 王润泽,谌芸,李铁,等. PAM 和草类根系对荒坡侵蚀劣地紫色土微团聚体的影响[J].草业学报,2017,26(12):13-23.

[3] 曾河水.不同治理模式侵蚀劣地土壤物理特性变化的研究[J].土壤,2001,33(5):260-263.

[4] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J].生态学报,2008,28(2):702-709.

[5] Sheikh M F R, Budiman Mi, Alex B, et al. Microbial processing of organic matter drives stability and pore geometry of soil aggregates [J]. Geoderma, 2020,360(1):114033.

[6] 杨玉盛,何宗明,陈光水,等.不同生物治理措施对赤红壤抗蚀性影响的研究[J].土壤学报,1999,36(4):528-535.

[7] 裴中健,梁成华,尹岩.不同栽培年限日光温室土壤团聚体的组成及稳定性[J].水土保持通报,2015,35(6):70-74,80.

[8] 成艳红,黄欠如,钟义军,等.种植苎麻对南方坡耕地土壤抗蚀性的影响[J].水土保持通报,2014,34(5):1-5.

[9] 石宗琳,王加旭,梁化学,等.渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J].土壤学报,2017,54(2):387-399.

[10] 王义祥,叶菁,黄毅斌,等.不同经营年限对柑橘果园土壤团聚体有机碳的影响[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):724-729.

[11] He Yangbo, Xu Cheng, Huang Rui, et al. Variation of soil aggregates in response to soil water under short-term natural rainfalls at different land use [J]. SN Applied Sciences, 2019,1(8):1-12.

[12] Liu Xiaoli, He Yuanqiu, Zhang H L, et al. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients [J]. Pedosphere, 2010,20(5):666-673.

[13] 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.

[14] Marie S, Luise G. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011,43(5):1081-1088.

[15] 黄婉霞,邓羽松,谢福倩,等.花岗岩崩岗不同部位土壤饱和导水率特征及其影响因素[J].应用生态学报,2020,31(7):2431-2440.

[16] 黄炎和,卢程隆,黄民粪,等.闽南侵蚀劣地土壤肥力特征及其培肥研究[J].水土保持通报,1993,13(2):1-4,22.

[17] 胡建民,胡欣,左长清.红壤坡地坡改梯水土保持效应分析[J].水土保持研究,2005,12(4):271-273.

[18] 王书玲.江西赣县金钩形小流域崩岗削坡开梯土壤水分特征及肥力研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2016.

[19] 邓羽松,丁树文,夏栋,等.赣县崩岗削坡开梯柑橘园土壤性质随种植年限的变化趋势[J].华中农业大学学报,2015,34(3):59-63.

[20] 黄娟,邓羽松,马占龙,等.桂东南花岗岩丘陵区不同土地利用方式土壤大孔隙特征[J].水土保持学报,2021,35(2):80-86,95.

[21] 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.

[22] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility (Ⅰ): Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 2016,67(1):11-21.

[23] 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.

[24] 林诚,郑祥洲,郭宝玲,等.亚热带地区不同种植年限果园土壤团聚体结构及有机碳、氮分布特征[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1560-1566.

[25] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2004,124(1):3-22.

[26] Humberto B C, Rattan L. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2004,23(6):481-504.

[27] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):129-135.

[28] 石宗琳,武大勇,王益权,等.不同种植年限对渭北地区果园土壤理化性质的影响[J].河南农业大学学报,2019,53(5):799-805.

[29] 陈旸,谢修鸿,杜鑫宇,等.种植年限对苹果梨园春季土壤团聚体分布的影响[J].江苏农业科学,2018,46(17):153-155.

[30] 杨东伟,章明奎,刘千千,等.土壤理化性质和微生物活性对水田改果园的动态响应[J].水土保持通报,2019,39(2):48-55.

[31] 魏彬萌,李忠徽,王益权.渭北旱塬苹果园土壤紧实化现状及成因[J].应用生态学报,2021,32(3):976-982.

[32] 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.

[33] 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.

[34] 唐骏,党廷辉,薛江,等.植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J].生态学报,2016,36(16):5067-5077.

[35] 王涛,何丙辉,秦川,等.不同种植年限黄花生物埂护坡土壤团聚体组成及其稳定性[J].水土保持学报,2014,28(5):153-158.