

桂西北峰丛洼地土壤结构对不同耕作模式的响应

张建兵^{1,2,3}, 罗为群¹, 张海安^{2,3}, 何柳春^{2,3}, 杨奇勇¹, 胡宝清^{2,3}

(1. 国土资源部 岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,

广西 桂林 541004; 2. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室,

南宁 530001; 3. 广西师范学院 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001)

摘要:桂西北喀斯特峰丛洼地地区因其广泛分布的石漠化和较强的石漠化风险, 一直是我国典型的生态脆弱与社会贫困区, 也是我国生态恢复与精准扶贫的攻坚区域。土壤障碍和人类不合理活动是该区石漠化的主要驱动因子, 评价人类活动对土壤的影响, 既是综合防治该区生态退化的基础, 也是持续利用该区有限土壤资源, 提升农户土地收入的前提。以桂西北典型峰丛洼地农作与生态恢复区——广西果化岩溶生态研究基地(建设于 2001 年初)为研究区, 研究了火龙果(HLG, 相当于免耕)、玉米(YMD, 相当于翻耕)、甘蔗种植(GZD, 相当于垄作+枝叶覆盖还田)3 种耕作模式下的土壤结构性质, 并将其与退耕还林恢复模式(LD)进行了对比, 以评价不同耕作模式的土壤结构效应。结果表明: 4 种模式下土壤结构差异明显, 与 LD 相比, 3 种耕作模式显著降低了湿筛土壤大团聚体含量, 尤以 YMD 为甚, 其 $>10\text{ mm}$ 含量为 17.99%, 而 LD 的高达 85.36%, 相同的趋势同样体现在干筛土壤团聚体含量方面, HLG, YMD, GZD, LD $>10\text{ mm}$ 含量分别为 57.78%, 9.29%, 28.07%, 59.55%; 各地类下干筛、湿筛的平均重量直径与几何平均直径变化趋势与含量趋势一致, 均以 LD 最高, YMD 最低; 土壤质地方面, 四者 $0.01\sim 2, 2\sim 20, 20\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ 含量大小顺序分别为 YMD $>$ LD $>$ HLG $>$ GZD, LD $>$ HLG $>$ YMD $>$ GZD, GZD $>$ HLG $>$ LD $>$ YMD; 同时, 耕作强度较为强烈的 YMD 增加了土壤容重, 并减少了土壤孔隙度。本研究认为火龙果种植具有较好的土壤结构保持效应, 相当于一种保护性耕作, 加之其较高的经济效益, 适于在桂西北喀斯特峰丛洼地地区推广种植。

关键词: 土壤结构; 耕作模式; 保护性耕作; 峰丛洼地; 农作区; 桂西北

中图分类号: S152.4; S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0037-06

Response of Soil Structure to Different Cultivation Patterns in the Typical Karst Peak-Cluster Depression of Northwest Guangxi

ZHANG Jianbing^{1,2,3}, LUO Wei-qun¹, ZHANG Hai-an^{2,3}, HE Liu-chun^{2,3}, YANG Qi-yong¹, HU Bao-qing^{2,3}

(1. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Control, Ministry of Land and Resources,

Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf,

Guangxi Teachers Education University, Ministry of Education, Nanning 530001, China; 3. Guangxi Key Laboratory of

Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China)

Abstract: Because of the wide distribution and high risk of rocky desertification, the northwest Guangxi, characterized by karst peak-cluster depression, is a typical ecological fragile and poor region. It is important to evaluate the soil quality under different land uses, to strengthen ecological restoration and to increase peasants' income in karst peak-cluster depression farming area because the soil problem and unscientific human activities are considered to be the key factors that cause the rocky desertification. Based on the Guohua Karst Ecological Research Base (founded in beginning of 2001), the objectives of this paper are to evaluate soil structure dynamics under three cultivation patterns, *Hylocereus undatus* (HLG), maize (YMD) and sugar-cane (GZD) cultivation, which was representative of the no-tillage, plowing and straw returning, respectively. The results showed that, compare to conversion of cropland to forest (LD), HLG, YMD and GZD decreased the

收稿日期: 2018-03-02

修回日期: 2018-05-05

资助项目: 国家自然科学基金(41601585); 广西自然科学基金(2015GXNSFBA139196); 国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金(YR-JJHT-2015-288); 广西科技攻关项目(1598016-11); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502401)

第一作者: 张建兵(1984—), 男, 四川广安人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤过程及其生态环境效应研究。E-mail: gxtczjb@163.com

通信作者: 罗为群(1980—), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 副研究员, 主要从事岩溶生态与环境治理研究。E-mail: oyrlwq@karst.ac.cn

contents of soil macroaggregate significantly both by the methods of wet sieving and dry sieving, the content of >10 mm soil macroaggregate was 17.99% in the patten of YMD under wet sieving, and 9.29% in dry sieving, and the contents of LD were 85.36% and 59.55% in the pattern of LD. Also, the mean weight diameter and geometric mean diameter by wet sieving and dry sieving decreased in the order: LD>HLG>GZD>YMD. Soil particle size changed with the cultivation pattern obviously, the particle size decreased in the order: YMD>LD>HLG>GZD, LD>HLG>YMD>GZD and GZD>HLG>LD>YMD presented in $0.01\sim 2\ \mu\text{m}$, $2\sim 20\ \mu\text{m}$ and $20\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ respectively. However, the soil bulk density increased in the pattern of YMD with the highest value of $1.28\ \text{g}/\text{cm}^3$ and the lowest value of soil porosity 51.52%. Consequently, it is suggested that *Hylocereus undatus* plantation is beneficial for karst peak-cluster depression area because of its strong ability of soil structure maintenance and high economic benefits.

Keywords: soil structure; cultivation patterns; conservation tillage; karst peak cluster farming area, north-west of Guangxi

我国是一个喀斯特大国,裸露型、埋藏型和覆盖型面积总和达 344 万 km^2 ,其中西南裸露型喀斯特区是全球三大碳酸盐岩连续分布区之一^[1]。桂西北喀斯特峰丛洼地,一个碳物质能量循环较为快速和异质性极强的系统,加之前期不合理的人类活动,水土流失严重,现多呈现出岩石裸露率高、渗透性强,土体零星、浅薄,生产力低、生态脆弱的石漠化景观^[2-3],已成为当地社会经济发展、生态环境改善的重要限制因子,也使该区成为我国贫困与环境退化问题最为突出的地区^[4-6],是我国现阶段精准扶贫与生态文明建设的重点地区之一。

喀斯特区碳酸盐岩具有易溶蚀、成土慢,且所成土壤土层薄、不连续、与其下伏的刚性岩石粘着力差、易流失,是导致喀斯特峰丛洼地生态脆弱、农业生产效益较低的关键因子,也是产生喀斯特石漠化的根本原因。同时,人为不合理土地利用导致的土壤侵蚀是石漠化最直接的影响因素^[7-8],并且在整个石漠化演变过程中,人类活动方式与强度及其引起的土壤质量演变起着主导作用,这也成了实施石漠化综合治理的基本出发点。因此,研究石漠化及其治理模式与土壤的相互关系,一直以来均是喀斯特研究领域的重点内容^[1-4]。

土壤结构是维持良好土壤功能的前提、作物高产稳产的重要保证,而土壤结构又是由无数土壤团聚体构成,其优劣通常用土壤团聚体的大小和稳定性来判断^[9-11]。同时,土壤颗粒组成、土壤容重及土壤孔隙度也是土壤结构的具体表征,受到了学者及土壤管理者的高度关注^[12-13]。土壤结构特征研究也是喀斯特研究领域的热点,如 Xiao 等^[14]以封育地为对照,对比研究了灌丛林地、薪材林地、牧草种植地和玉米地的土壤团聚体情况以及团聚体对碳、氮和微生物活性的影响;卢凌霄等^[15]以喀斯特峰丛洼地的伊桐、侧柏

和菜豆树 3 个原生林植物群落为对象,分析了土壤团聚体的组成、有机碳及其剖面分布。但当前喀斯特土壤结构研究多集中在研究山区不同石漠化治理模式(多为自然恢复或林业恢复领域)对土壤结构的影响,探讨农作区的较为罕见。农作区是喀斯特峰丛洼地区土地利用的热点区域,是当地居民生产活动(主要为耕作活动)的集中区。因此,该区人类活动对土壤的干扰强度更大,土壤流失风险亦高。耕作模式的适宜性是保持农作区土地生产效益和降低水土流失(石漠化)风险的关键。因此,评价各类耕作模式的土壤环境效应对保障峰丛洼地农作区土地可持续利用具有重要意义。针对此问题,本文以典型峰丛洼地——广西果化岩溶生态研究基地为研究区域,研究了其主要的耕作模式——火龙果种植、传统旱地耕种(玉米、甘蔗)对土壤结构系列指标的影响,并以退耕还林地作为对照,以评价不同耕作模式的土壤结构效应,筛选适合当地土壤保育的土地利用模式,为当地土壤可持续利用与生态风险防范提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

广西果化岩溶生态研究基地,建于 2001 年,现为国土资源部野外科学观测研究基地,位于广西平果县果化镇 210° 方向约 5 km 处($107^\circ 22' 30''$ — $107^\circ 24' 47''\text{E}$, $23^\circ 22' 30''$ — $23^\circ 24' 32''\text{N}$),主要研究领域为峰丛洼地石漠化演变、生态恢复过程与生态环境效应。该区地处亚热带季风气候区,日照充足,年日照时数平均 1 682 h,日照百分率 38%;气候温和湿润,年均气温 21.5°C ,无霜期 345 d 以上;雨量充沛,平均年雨量 1 400~1 550 mm。该区属典型的岩溶峰丛洼地,地层主要为石炭系上统,岩石主要为纯石灰岩。区内峰

丛山体岩溶发育强烈,地表、近地表的溶沟、溶槽、溶孔、溶穴、溶痕及石芽等发育,厚度大多 3~5 m,局部 6.5~9.0 m,构成表层岩溶带,成为水循环的重要调蓄带。洼地有较多落水洞、竖井、天窗、岩溶裂隙,是降雨坡面产流的主要排水点^[16]。土壤类型主要为棕色石灰土。

基地建设初期,该区以其人口密度大、植被覆盖率低(治理前不足 10%)、石漠化程度严重、类型齐全、生态环境恶劣而成为我国西南岩溶峰丛洼地石漠化区的典型代表。在国家科技攻关课题、科技支撑计划课题、地质调查项目、国家自然科学基金、广西科技攻关课题等几十项石漠化治理相关项目的支持下,基地开展了封山育林、生态农业、表层岩溶水开发、高效农业节水灌溉、土地整理、土壤改良、水土保持等技术的石漠化治理研究,其中植被恢复模式面积 50 hm²,土地整理面积 2 hm²,保护性耕作面积 10 hm²。经过 15 a 的治理,基地石漠化得到了遏制,生态环境显著改善,资源利用率和生产率得到提高,取得了良好的治理效果,植物覆盖率已提高到目前的 75%以上,其多模式、长时间样地为本研究的开展提供了良好的野外试验平台。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与样品采集 为评价研究区不同耕作措施的土壤结构效应,选择了该区主要的耕作模式——火龙果种植(HLG)、甘蔗地种植(GZD)、玉米地种植(YMD),并以退耕还林地(LD)为对照样地,各样地情况介绍见表 1。2016 年 7 月,在各耕作模式样地中选择典型样地(至少 3 块样地,农户田块),分别采集表层(0—10 cm)原状土(挖掘剖面采集)、环刀(直径 5 cm)及土钻(直径 3 cm)样品以分析其土壤结构性质,各样地随机采集 3 样点(土钻样品为 5 个样点)。原状土样品用硬质保鲜盒带回实验室,环刀样品保持在环刀内整体带回,土钻样品用采样袋带回。

1.2.2 样品处理与分析 原状土样品运回室内,轻掰分割,使其沿自然裂隙分离为直径为 10~20 mm 间的小土块,并剔除较为明显的根系和小石块,自然风干后,分别用干筛法和湿筛法测定 0.25~0.5 mm,0.5~1 mm,1~2 mm,2~3 mm,3~5 mm,5~7 mm,7~10 mm,>10 mm 粒级团聚体含量^[17]。土钻样品自然风干后,磨碎过 2 mm 筛后备用。采用环刀法测定土壤容重、激光粒度仪(Mastersizer 2000)测定土壤机械组成。土壤孔隙度^[12,18]、平均重量直径(MWD)^[19]、几何平均直径(GMD)^[19]采用公式法计算,其计算公式分别为:




总孔隙度=(1-土壤容重/土壤比重)×100% (1)
式中:土壤比重取值为 2.65 g/cm³。

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{2}$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \tag{3}$$

式中: w_i 为*i*粒级团聚体重量所占的比例; \bar{x}_i 为*i*级团聚体平均直径。

表 1 样地描述

样地名称	样地实景	样地描述
火龙果种植样地 (HLG)		火龙果种植间距一般为 1.5~2.0 m,立水泥桩供其搭附,种植后不再翻耕土地,培肥活动主要集中于火龙果根区,相当于免耕耕作模式。样地已种植火龙果 10 a 左右,一年可采收 4 次,年收入为 135 000 元/hm ² (基地及附近农户调查数据均值)
甘蔗地种植样地 (GZD)		垄作,一次埋种甘蔗种条后,可连续收割 3 a,每年收割一次,收割时不需扰动土壤,日常管理为甘蔗根际撒施化肥,待甘蔗成熟时剥叶还田。相当于覆盖与少耕的耕作模式。年收入为 37 500 元/hm ² (基地及附近农户调查数据均值)
玉米地种植样地 (YMD)		单作玉米,每年两季,均采取翻耕播种,相当于翻耕种植模式。年收入为 12 000~15 000 元/hm ² (基地及附近农户调查数据均值)
退耕还林地 (LD)		退耕还林地,经过 10 余年的恢复,地表已有较好植被覆盖,植被多为草灌,其中乔木为人工种植任豆树,灌木主要有黄荆等,草本主要有芒草、肾蕨等。本研究中,林地作为参照样地

1.2.3 数据处理与分析 所有数据采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件进行分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,Pearson 相关系数评价不同土壤结构指标间的相关关系,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式对土壤团聚体机械稳定性的影响

不同耕作模式对喀斯特峰丛洼地农作区土壤干筛团聚体含量影响明显,体现在不同粒级(0.25~0.5 mm,0.5~1 mm,1~2 mm,2~3 mm,3~5 mm,5~

7 mm, 7~10 mm, >10 mm)团聚体含量在各耕作模式之间具有显著差异($p<0.05$;仅 7~10 mm 粒级 p 值为 0.14, 差异性不显著), 并整体呈现出随着扰动频率(扰动频率大小顺序为 YMD>GZD>HLG>LD)的增加, 大粒级团聚体含量(>10 mm)降低、小粒级(7~10 mm, 5~7 mm, 3~5 mm, 2~3 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm)团聚体含量比例增加的趋势(图 1)。如>10 mm 土壤团聚体含量在不同耕作模式之间的分布趋势为 LD>HLG>GZD>YMD, 其值分别为 59.55%, 57.78%, 28.07%, 9.29%; 而 0.25~0.5 mm 团聚体含量在耕作模式间的分布则相反, 其值分别为 4.22%, 4.53%, 7.85%, 12.04%。

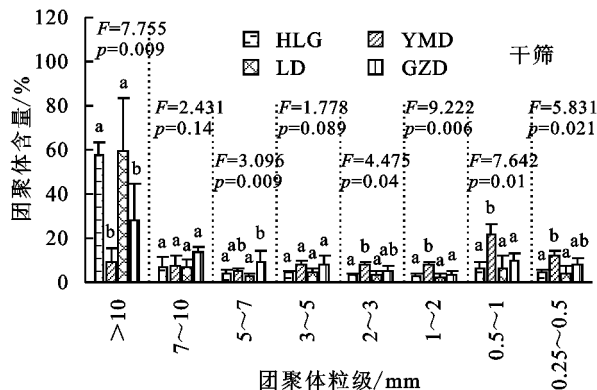


图1 土壤团聚体机械稳定性特征及其对不同耕作模式的响应

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)是表征土壤团聚体分布的两个综合指标, 克服了直接用含量表示团聚体信息时的繁琐与单调问题, 现已为相关研究者所广泛使用^[19], 两者的值越大, 表示团聚体情况越优。如图2所示, 研究区干筛土壤团聚体 MWD, GMD 值分别介于 3.41~7.80 mm, 1.94~6.25 mm 之间, 其最大值均为 LD, 最小值为 YMD, 在不同耕作模式之间的大小分布趋势为 LD>HLG>GZD>YMD, 且组间差异均达到显著水平($p<0.05$), 这与大团聚体含量分布趋势一致, 表明扰动对土壤团聚体的整体特征同样有显著的影响。

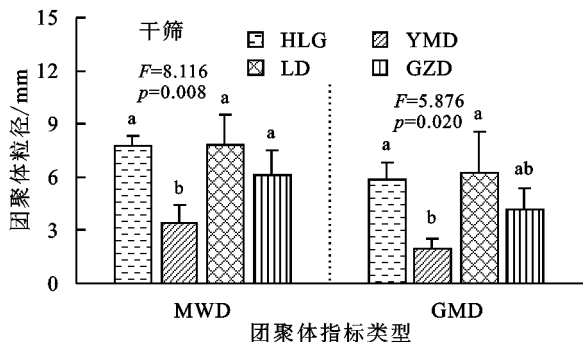


图2 不同耕作模式对土壤干筛团聚体平均质量直径与几何平均直径的影响

2.2 不同耕作模式对土壤水稳性团聚体特征的影响

土壤水稳性团聚体分析结果与干筛团聚体的分布趋势一致, >10 mm 土壤水稳性团聚体含量在各耕作模式之间的分布趋势为 LD>HLG>GZD>YMD, 而其余各粒级土壤团聚体分布趋势均与此相反; 同时, 土壤水稳性团聚体对耕作模式改变的响应更为敏感, 表现在各粒级水平上, 不同地类之间的差异性均达显著水平(图 3)。再者, 相对于土壤干筛团聚体来说, 峰丛洼地土壤的水稳性高于机械稳定性, 以>10 mm 粒级含量为例, HLG, YMD, LD, GZD 干筛土壤团聚体含量分别为 57.78%, 9.29%, 59.55%, 28.07%, 而四者湿筛含量分别为 44.42%, 17.99%, 85.36%, 41.42%, 这可能与喀斯特峰丛洼地土壤中含有强胶结性物质有关, 当其遇水时能增加土壤颗粒之间的胶结作用, 进而增加大团聚体的含量^[20]。

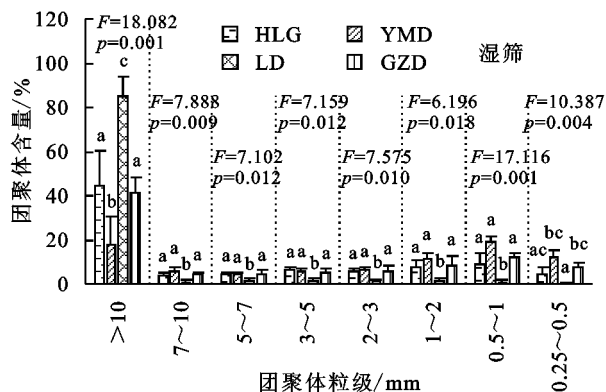


图3 土壤湿筛团聚体的分布及其对不同耕作模式的响应

土壤水稳性团聚体 MWD, GMD 对耕作模式的响应同样具有显著的敏感性。4 种样地中, 林地土壤团聚体情况最优, MWD, GMD 值分别达到了 9.54, 9.10 mm, 而玉米地的值最低, 分别为 3.95, 2.19 mm (图 4)。火龙果种植土壤团聚体得以稳定保持的原因在于火龙果种植后土地不需再翻耕, 而甘蔗地团聚体也相对稳定的原因则在于较少的翻耕(2~3 a 翻耕 1 次), 且甘蔗秸秆还田归还了有机质, 有利于土壤结构稳定性的维持。土壤水稳性团聚体 MWD, GMD 值均高于干筛, 再次验证了研究区土壤团聚体的水稳性高于机械性。

2.3 不同耕作模式对土壤颗粒分布的影响

研究区不同耕作模式土壤颗粒集中分布于 2~20 μm 之间, 其平均比例达 60% 以上, 远高于 0.01~2 μm , 20~2 000 μm 的 20% 左右, 表明研究区土壤颗粒属于粉砂性。同时, 3 粒级颗粒含量对耕作模式的演变响应不明显, 在各地类之间的差异性均不显著, 稍微表现出耕作强度大的耕作模式(YMD)有降低大

粒级土粒的趋势,即相对于其他地类来说,玉米地因其高强度的翻作活动引起了土壤颗粒的碎化作用,从而拥有最高含量的黏粒、中等比例的粉砂和低比例的砂粒含量;而林地由于扰动性小,拥有最高含量的粉砂颗粒(图5)。

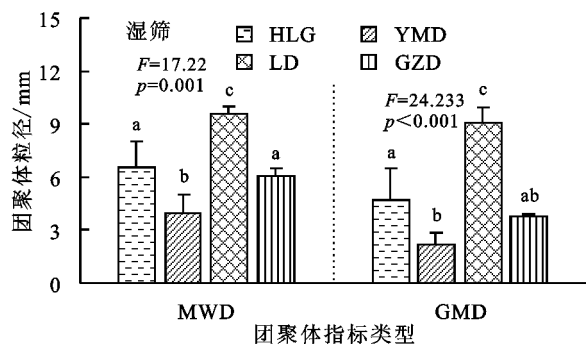


图4 不同耕作模式对土壤湿筛团聚体平均质量直径与几何平均直径的影响

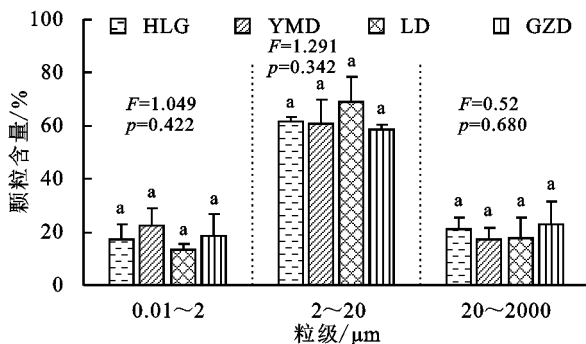


图5 土壤颗粒含量变化及其对耕作模式的响应

2.4 不同耕作模式对土壤容重与孔隙度的影响

研究区土壤容重、土壤孔隙度均值分别为 1.20 g/cm^3 , 54.50% ,二者与耕作模式的改变均具有一定响应关系,但差异不显著(图6)。火龙果地与甘蔗地容重较小,而玉米地与林地则较大;前两者因其较少的耕作频率、加之培肥活动,有机质含量高,土壤结构较为稳定,容重较小;玉米地则由于高强度的翻作活动,土壤结构破碎,单位容积内土壤固相颗粒含量高,容重大;林地则因为其较为稳定的土壤环境,单位容积内滞留的粉砂粒和黏粒含量较高,容重也较大。土壤孔隙度与容重在不同耕作模式之间的分布趋势与容重相反,容重与孔隙度具有一定的互为消长的关系,单位容积内,土壤固相颗粒越多,表明土壤越紧实,孔隙越少,即表征为土壤容重大,孔隙度低。

3 讨论

土壤结构是土壤功能的关键指标之一,通常用土壤团聚体、土壤颗粒、容重和孔隙度等指标表征,承载着土壤动植物生存、土地生产与环境协调等生态服务

价值,其优劣指示着土壤的退化与否,并与土地利用或耕作管理方式直接相关^[21-23]。本文研究结果支撑该论断,即桂西北峰丛洼地区土壤结构特征同样受到不同耕作模式的影响;同时,该结果与前期研究喀斯特区植被恢复模式对土壤结构影响的研究结论呼应,均表明扰动性小的土壤管理方式有利于保持土壤结构的稳定性^[24-26]。

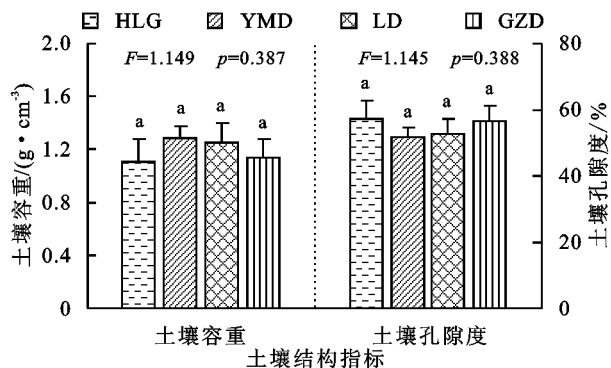


图6 不同耕作模式下的土壤容重与孔隙度分布情况

土壤结构各指标间的相关性同样是土壤结构研究的热门问题,其结果有利于探讨土壤结构的组成、形成与演变^[26-27]。本文研究结果显示(表2),喀斯特峰丛洼地土壤机械性与水稳性团聚体之间具有显著相关性,表明两者规律一致,均能有效表明土壤结构的稳定性。土壤黏粒与粉砂含量对土壤结构稳定性(MWD,GMD)影响较大,其中前者为负相关,后者为正相关,这说明研究区土壤粉砂颗粒如果遭到细碎化,将降低土壤结构的稳定性,这与前面分析结果一致,也更为深入地解释了玉米地土壤团聚体稳定性最低的原因。容重与孔隙度同样对土壤结构稳定性具有影响,其中前者为负面影响,后者为正面影响。容重与土壤黏粒呈正相关性,孔隙度与黏粒呈负相关,说明了研究区土壤颗粒的细碎化将压缩土壤孔隙,增大土壤容重,不利于土壤结构的稳定维持,这可能与频繁扰动导致土壤颗粒细碎化,不利于保持土壤有机质及胶结物质有关,从而降低了土壤颗粒之间的胶结作用,降低了土壤结构的稳定性^[28-30]。

研究区火龙果和甘蔗种植具有良好的土壤结构效应,团聚体数量与综合指标均表现优秀,而稳定的团聚体可组成良好的土壤结构,促进能流和物流循环,为植物生长提供顺畅的运输通道,不稳定的团聚体则易产生更小的可迁移颗粒,既阻碍土壤养分运移,又加剧地表径流和土壤侵蚀^[15]。因此,火龙果与甘蔗地种植能通过提升土壤结构性能,提高土壤抗侵蚀能力,进而有效地抑制喀斯特区水土最大问题——水土流失/漏失问题。

表 2 土壤结构性质间的 Pearson 相关性分析

项目	DMWD	DGMD	WMWD	WGMD	Clay	Silt	Sand	BD	Porosity
DMWD	1.00								
DGMD	0.98**	1.00							
WMWD	0.73**	0.72**	1.00						
WGMD	0.65*	0.65*	0.98**	1.00					
Clay	−0.52	−0.52	−0.60*	−0.58*	1.00				
Silt	0.48	0.57	0.47	0.49	−0.57	1.00			
Sand	−0.03	−0.13	0.06	0.02	−0.35	−0.57	1.00		
BD	−0.41	−0.43	−0.05	0.02	0.55	−0.07	−0.47	1.00	
Porosity	0.41	0.42	0.05	−0.02	−0.55	0.06	0.48	−1.00**	1.00

注：*表示 $p<0.01$ ，差异性为极显著水平；*表示 $p<0.05$ ，差异性为显著水平。DMWD 表示干筛土壤团聚体平均重量直径，DGMD 表示干筛土壤团聚体几何平均直径，WMWD 表示湿筛土壤团聚体平均重量直径，WGMD 表示湿筛土壤团聚体几何平均直径，Clay 表示土壤黏粒（0.01~2 μm ），Silt 表示土壤粉砂粒（2~20 μm ），Sand 表示土壤砂粒（20~2 000 μm ），BD 表示土壤容重，Porosity 表示土壤孔隙度。

4 结 论

峰丛洼地农作区土壤结构对不同耕作模式的响应关系明显。整体来说，随着耕作模式扰动性的增强，土壤结构指标变差，具体表现为土壤大团聚体含量减小、小团聚体含量增加，这在土壤机械性与水稳性团聚体各粒级含量比例、平均重量直径和几何平均直径方面均有明显体现，团聚体优劣性排序在各地类之间呈现出 LD>HLG>GZD>YMD 的规律。研究区土壤颗粒为粉砂性，对耕作模式改变的响应较弱，但耕作强度的增大，有引起土壤颗粒细碎化的趋势。不同耕作模式对土壤容重和孔隙度也有较为明显的改变，扰动性大的模式将增大土壤容重，减小土壤孔隙度。

土壤结构是表征喀斯特地区土壤抗蚀性、评价石漠化风险的关键指标，当土壤结构性能提升时，土壤抗蚀性增强，水土流失/漏失程度降低，石漠化风险随之下降。同时，土壤结构体现了土壤质量的优劣，土壤结构好有利于保持土壤系统肥力环境，提高土壤生产力，反之则导致土壤贫瘠。研究区不同耕作模式下的土壤结构演变特征显示，火龙果与甘蔗种植具有良好的土壤结构维持效应，起到了保护性耕作的效果，从而利于增强土壤抗蚀性、防止峰丛洼地农作区的水土流失/漏失问题；此外，火龙果经济效益高，若辅以相关产业链的开发，红龙果种植可以作为喀斯特石漠化区扶贫与生态保育的生态农业产业之一。

参考文献：

[1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-27.

[2] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41-43.

[3] 张殿发, 王世杰, 周德全, 等. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制[J]. 水土保持通报, 2001, 21

(4): 1-5.

[4] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in South-west China: Impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(3): 1-12.

[5] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.

[6] 覃星铭, 何丙辉, 吴华英. 岩溶山区土壤水的地球化学特征及其与土壤环境的关系[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 280-289.

[7] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.

[8] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 365-371.

[9] Amézketa E. Soil aggregate stability: a review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2/3): 83-151.

[10] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.

[11] 王彩霞, 王旭东, 朱瑞祥. 保护性耕作对土壤结构体碳氮分布的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 386-495.

[12] 田效琴, 田佳乔, 李卓, 等. 保护性耕作下西南黄壤坡地的土壤结构效应[J]. 中国农学通报, 2017, 33(14): 62-68.

[13] Márquez C O, Garcia V J, Cambardella C A, et al. Aggregate-size stability distribution and soil stability [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 725-735.

[14] Xiao S S, Zhang W, Ye Y Y, et al. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem [J]. Scientific Reports, 2017, DOI:10.1038/srep41402.

[15] 卢凌霄, 宋同清, 彭晚霞, 等. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1167-1174.

[16] 罗为群, 张辉旭, 蒋忠诚, 等. 岩溶峰丛洼地不同环境水土流失差异及防治研究: 以广西果化岩溶生态研究基地为例[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 473-480.

- 肥效果及土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1168-1177.
- [14] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 等. 山地森林表层土壤酶活性对短期增温及凋落物分解的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7071-7079.
- [15] 李彦霖, 闫锐, 高雪松, 等. 不同种养废弃物还田对复垦宅基地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 283-288.
- [16] 王朋超, 孙约兵, 徐应明, 等. 施用磷肥对南方酸性红壤镉生物有效性及土壤酶活性影响[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 150-158.
- [17] 孙双红, 陈立新, 李少博, 等. 阔叶红松林不同演替阶段土壤酶活性与养分特征及其相关性[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(2): 20-28.
- [18] 王一, 刘彦春, 刘世荣. 暖温带森林土壤酶活性对增温的响应及其环境解析[J]. 林业科学研究, 2017, 31(1): 117-124.
- [19] 李丽娜, 滕应, 任文杰, 等. 石墨烯施用后对土壤酶活性及土壤微生物群落的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 102-108.
- [20] 孟庆阳, 王永华, 靳海洋, 等. 耕作方式与秸秆还田对砂姜黑土土壤酶活性及冬小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 341-346.
- [21] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371-377.
- [22] 陈鸿飞, 庞晓敏, 张仁, 等. 不同水肥运筹对再生季稻根际土壤酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(10): 1507-1517.
- [23] 段雄伟, 刘亚玲, 黎华寿, 等. 高氯酸盐和铬复合污染对土壤酶活性及微生物数量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 322-331.
- [24] 司鹏, 乔先生. 清耕和生草对沙地葡萄园土壤酶活性的空间影响[J]. 果树学报, 2014, 31(2): 238-244.
- [25] 王文锋, 李春花, 黄绍文, 等. 不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 873-882.
- [26] 张鑫, 耿玉清, 徐明, 等. 鄱阳湖湖滨湿地土壤酶活性及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 34-40.

~~~~~

(上接第 42 页)

- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [18] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [20] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators [J]. Catena, 2001, 44(1): 47-67.
- [21] Chan K Y, Heenan D P, So H B. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review[J]. Animal Production Science, 2003, 43(4): 325-334.
- [22] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1): 3-22.
- [23] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [24] 张治伟, 傅瓦利, 张洪, 等. 石灰岩土壤结构稳定性及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 164-168.
- [25] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2147-2156.
- [26] 胡阳, 邓艳, 蒋志诚, 等. 典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 61-67.
- [27] Duiker S W, Rhoton F E, Torrent J, et al. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 606-611.
- [28] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 2010, 33(2): 141-163.
- [29] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.
- [30] Attou F, Bruand A, Bissonnais Y L. Effect of clay content and silt-clay fabric on stability of artificial aggregates [J]. European Journal of Soil Science, 2010, 49(4): 569-577.
- [31] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls[J]. Geoderma, 1996, 74(1/2): 65-105.