环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷 第5期
2024年 5月 15日

目 次

西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响

江可, 贾亚男*, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家
（西南大学地理科学学院，岩溶环境重庆市重点实验室，重庆 400715）

摘要： 土壤团聚体稳定性与团聚体有机碳的关系及其对土地利用变化的响应研究，对西南岩溶区估算土壤碳汇潜力、改善石漠化问题和土地利用管理有重要意义．为探究西南岩溶区土地利用方式变化对土壤团聚体组分、稳定性及团聚体有机碳含量的影响，选取次生林、柚子林、水田、花椒林和旱地这5种典型土地利用方式下0～30 cm的土壤为研究对象，分析了不同土地利用方式下土壤团聚体组分及其有机碳含量的变化规律，揭示了土壤团聚体组分与团聚体有机碳含量之间的关系，探讨了土地利用方式变化后土壤团聚体对有机碳含量变化的贡献．结果表明，次生林、柚子林和水田表层（0～15 cm）土壤中大团聚体的含量分别为63.32%、52.38%和47.77%，显著高于旱地（23.70%），下层（15～30 cm）土壤趋势相同；次生林、柚子林和水田土壤团聚体的几何平均直径（GMD）和平均质量直径（MWD）显著高于旱地．表层土壤中，次生林和水田的有机碳含量显著高于其他土地利用方式，下层土壤中，只有水田的有机碳含量显著高于其他．各土地利用方式下，团聚体有机碳含量均表现为：大团聚体>微团聚体>粉黏粒．大团聚体对土壤有机碳含量的增加具有积极作用，而粉黏粒组分则有消极作用．相关性分析表明，土壤大团聚体含量与GMD、MWD及土壤团聚体有机碳含量均呈显著正相关．土壤大团聚体含量的增加有利于提高土壤团聚体的稳定性和储存土壤有机碳，适度发展林业和水田耕作有利于提高西南岩溶区土壤的固碳潜力．

关键词： 土地利用变化；土壤团聚体；土壤有机碳（SOC）；稳定性；岩溶区
中图分类号： X144　**文献标识码：** A　**文章编号：** 0250-3301(2024)05-2840-08　**DOI：** 10.13227/j.hjkx.202306148

Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China

JIANG Ke, JIA Ya-nan*, YANG Yan, CHEN Jian-qi, YU Pu-jia
(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Investigating the relationship of soil aggregate stability with the organic carbon in the aggregate and its response to land use change is conducive to the estimation of soil carbon sink potential, improvement of rocky desertification, and rational land use in karst areas of Southwest China. In order to explore the effects of land use change on the composition and stability of soil aggregate stability as well as the content of aggregate organic carbon, the soil (0-30 cm) of five land use types (secondary forest, pomelo forest, paddy field, pepper forest, and dry land) was selected as the research object. The characteristics and correlation of soil aggregate components and organic carbon under different land use patterns were obtained, and the contribution of soil aggregates to the change in organic carbon after land use change was calculated. The results showed that the macroaggregates in the surface soil (0-15 cm) of the secondary forest, pomelo forest, and paddy field were 63.32%, 52.38%, and 47.77%, respectively, which were significantly higher than that of dry land (23.70%), as was also seen in the lower layer (15-30 cm). The geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) of soil aggregates in the secondary forest, pomelo forest, and paddy field were significantly higher than those in dry land. In the surface soil, the organic carbon of the secondary forest and paddy field was significantly higher than that of other land use patterns. By contrast, in the lower soil layer, only the organic carbon of the paddy field was significantly higher than that of the others. Under different land use patterns, the organic carbon content of aggregates followed the same order of macroaggregates > microaggregates > silt and clay, indicating that macroaggregates allowed soil organic carbon to accumulate, whereas silt and clay did the opposite. According to correlation analysis, the content of soil macroaggregates was significantly positively correlated with GMD, MWD, and soil aggregate organic carbon, suggesting that the increase in soil macroaggregates could improve the stability of soil aggregates and store more soil organic carbon. Further, as land use change may have significantly affected the soil aggregate, moderate development of forestry and paddy cultivation is suggested to improve the soil carbon sequestration potential in the karst area of Southwest China.

Key words: land use change; soil aggregates; soil organic carbon (SOC); stability; karst area

土壤是地球关键带的重要组成，是人类赖以生存和发展所需最基本的自然资源之一[1]，研究人类活动对土壤的影响及其响应是地球系统科学在岩溶地区的重要应用[2]．IPCC关于气候变化与土地的特别报告指出，土地利用的方式和强度显著影响土壤碳汇[3]．土壤团聚体是土壤的重要组成和基本单元，是维持土壤生产力和土壤结构稳定的关键[4]．土壤团聚体对土壤有机碳（soil organic carbon，SOC）有物理保护作用并能影响土壤有机碳的固存，因而对估算土壤碳汇有重要意义[5,6]．

土地利用方式变化导致土壤结构的变化[7]，显

收稿日期： 2023-06-18；**修订日期：** 2023-08-15
基金项目： 国家自然科学基金项目（42277048）；重庆市教委创新人才培养雏鹰计划项目（CY220211）；重庆市自然科学基金项目（CSTB2022NSCQ-MSX0753）
作者简介： 江可（1996～），女，硕士研究生，主要研究方向为岩溶环境与土壤碳循环，E-mail：carol_1996@163.com
* 通信作者，E-mail：jiayanan@swu.edu.cn

著影响土壤团聚体粒径的分布和稳定性，土壤结构与SOC之间的关系是研究土壤碳的关键[8]. 近年来，有研究表明土地利用方式变化导致土壤中粉黏粒的含量降低[9]，在黄土高原的研究发现团聚体的稳定性随着大团聚体含量的变化而改变[10]，一些研究发现大团聚体对土地利用变化响应更为敏感，其中的有机碳也更易流失[11,12]. 此外，有研究指出大团聚体的含量与SOC含量呈极显著正相关，且土壤团聚体的稳定性随着SOC含量升高而提高[13]，但也有学者认为团聚体含量与SOC含量之间没有显著相关性[14]. 由于区域性限制和人类活动干扰，以上结论普遍存在一定局限性甚至是矛盾.

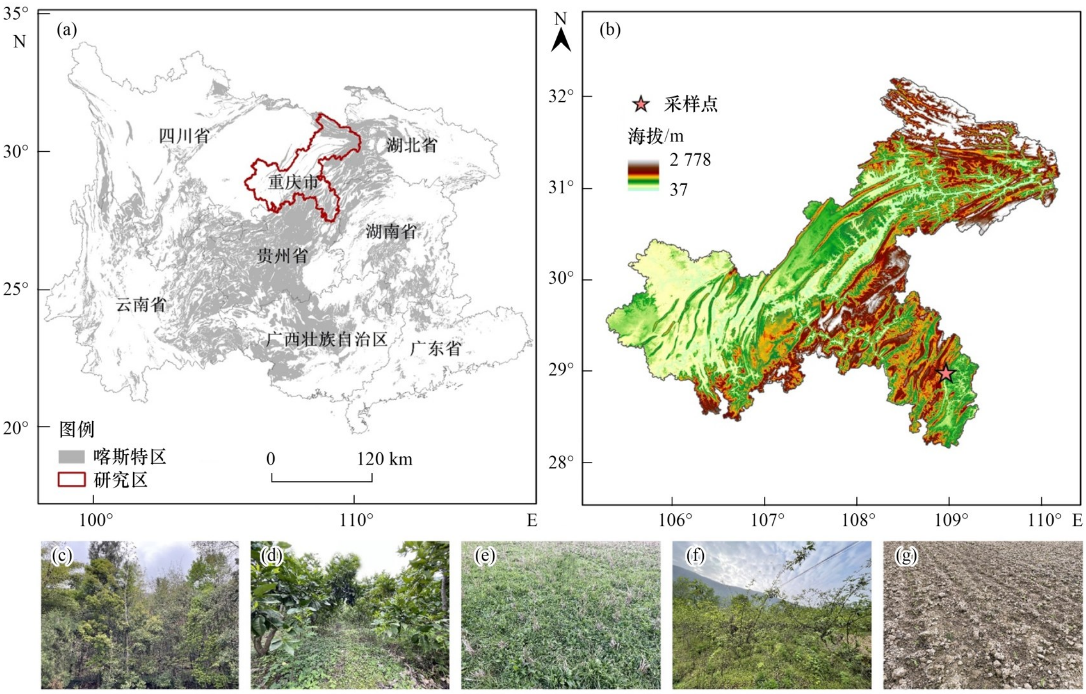
我国西南地区岩溶区域分布广泛，地质背景特殊，石漠化问题严重，SOC流失显著，土壤质量明显退化[2,15]. 我国通过实施大规模的自然封育和退耕还林工程，石漠化问题显著好转，植被的恢复提高了土壤质量和固碳的潜力[16~18]. 与此同时，西南地区积极发展花椒、柚子等经济作物的种植，土地利用方式日渐多样. 然而，西南岩溶地区土地利用方式变化后土壤团聚体的变化规律及其与SOC之间的关系尚不明确，此前的研究多聚焦于全土而较少涉及团聚体，对水田这类存在干湿交替现象的特殊土地利用方式的研究也较为少见[19]. 此外，全球变化背景下，频繁的暴雨等加剧了土壤侵蚀，土壤结构更易退化，威胁土壤健康与粮食安全，对土地利用管理提出了挑战，亟需土壤团聚体稳定性及其有机碳含量的相关研究.

鉴于此，以我国西南岩溶地区典型的石漠化区域重庆市酉阳龙潭槽谷为例，采用空间代替时间的方法，选取5种具有代表性的土地利用方式(次生林、柚子林、水田、花椒林和旱地)下0 ~ 30 cm土层的土壤，测定土壤团聚体组分及团聚体有机碳含量，分析并揭示土地利用方式变化对土壤团聚体组分、稳定性及有机碳的影响及其相关性，探讨土壤团聚体在土壤碳循环过程中的作用，以期为西南岩溶区土地利用管理、石漠化治理和“双碳”目标的实现提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

龙潭槽谷位于重庆市酉阳土家族苗族自治县(图1)，地处武陵山区，属于背斜型岩溶低位槽谷，海拔高350 ~ 380 m，基岩由寒武系和奥陶系白云岩构成. 县域属亚热带季风气候区，年均温约15 ℃，年均降水量约1 300 mm，属石漠化重点治理区域. 研究区土壤为石灰土，植被类型为亚热带常绿阔叶林. 研究区内主要的土地利用方式为旱地、水田和经济林等.



(a)西南岩溶区,(b)研究区,(c)次生林,(d)柚子林,(e)水田,(f)花椒林,(g)旱地

图1　研究区概况及采样点示意

Fig. 1　Map of study area and sampling sites

1.2　样本采集

土壤样品于2022年4月采自重庆市酉阳土家族苗族自治县泔溪镇泉孔村(29°00′ N，108°57′ E). 按空间代替时间的原则，根据高程、坡度、土壤母质

相似的原则选取西南地区具有代表性的5种土地利用方式作为处理：次生林[图1(c)]、柚子林[图1(d)]、水田[图1(e)]、花椒林[图1(f)]和旱地[图1(g)]，两种耕地自1950 s开始种植，两种经济林为石漠化治理所植并已持续利用10 a以上，次生林为响应退耕还林政策所植，生长年限已超过20 a，主要以青冈(*Quercus glauca* Thunb.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和女贞(*Ligustrum lucidum*)为主. 在每种土地利用方式下，选取了4个1 m×1 m独立的重复样方，为保证土样的独立性并避免数据的假重复，各样方之间的间距均大于20 m[20]. 在每个样方随机选取3个取样点，使用环刀分两层(0 ~ 15 cm和15 ~ 30 cm)采集土壤样品，将土样用铝盒小心装好编号并转移至实验室. 土壤样品在去除石块、植物根系和凋落物后自然阴干备用.

1.3 实验方法

土壤团聚体的分布采用湿筛法[21]测定. 称取50 g阴干的土样，置于1 L去离子水中充分浸泡至饱和，将饱和土样转移至套筛(孔径分别为0.25 mm和0.053 mm)中，在保证水面没过土样的前提下来回振荡筛动至少100次，收集各粒径土样后使用烘箱50 ℃烘干至恒重，称量得到不同粒径大小的团聚体质量，计算各粒级团聚体在原土样中所占的比例. 参考《美国农业部土粒分级标准》并依据Tisdall等[22]的观点，将粒径> 0.25 mm的团聚体组分记为大团聚体，0.053 ~ 0.25 mm的记为微团聚体，< 0.053 mm的记为粉黏粒组分.

土壤及各土壤团聚体有机碳含量均采用重铬酸钾-外加热法[23]测定.

使用几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)和平均质量直径(mean weight diameter, MWD)来衡量土壤团聚体的稳定性[24]，具体计算步骤见公式(1)和公式(2).

$$\mathrm{GMD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega_i \ln\bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i}\right] \quad (1)$$

$$\mathrm{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{x}_i \cdot \omega_i)}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i} \quad (2)$$

式中，ω_i为所属第i个团聚体组分质量占全土质量之比，$\bar{x}_i$为该粒径团聚体的平均直径.

不同粒径团聚体对土地利用变化后全土有机碳含量贡献的计算见公式(3).

$$\Delta C = (C_A \cdot w_A)(C_B \cdot w_B) \quad (3)$$

式中，C和w分别为所处粒径的有机碳含量和团聚体含量.

1.4 数据处理分析

采用Excel 2021整理实验数据，使用IBM SPSS Statistics 16.0进行数据的单因素方差分析(One-way ANOVA)，并通过最小显著性差异法(LSD法)检验数据差异的显著性($P < 0.05$)，利用R 4.2.3做相关性分析并可视化结果，采用Origin Pro 2022绘制图表.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤团聚体分布差异

土地利用方式对土壤团聚体在全土中的分布具有显著影响(图2). 在0 ~ 15 cm土层中，5种土地利用方式下土壤大团聚体含量的大小关系依次为：次生林(63.32%)>柚子林(52.38%)≈水田(47.77%)>花椒林(32.55%)>旱地(23.70%). 在15 ~ 30 cm土层中，次生林、柚子林和水田中土壤大团聚体含量显著高于花椒林和旱地. 整体上看，同一土地利用方式下，表层0 ~ 15 cm土壤大团聚体含量高于下层15 ~ 30 cm土壤.

同一土地利用方式下，大团聚体、微团聚体以及粉黏粒3个组分具有良好的分异性(图2). 其中，次生林和柚子林的大团聚体含量在土壤表层和下层均显著高于微团聚体和粉黏粒，花椒林和旱地土壤中微团聚体含量最大且显著高于大团聚体和粉黏粒的含量.

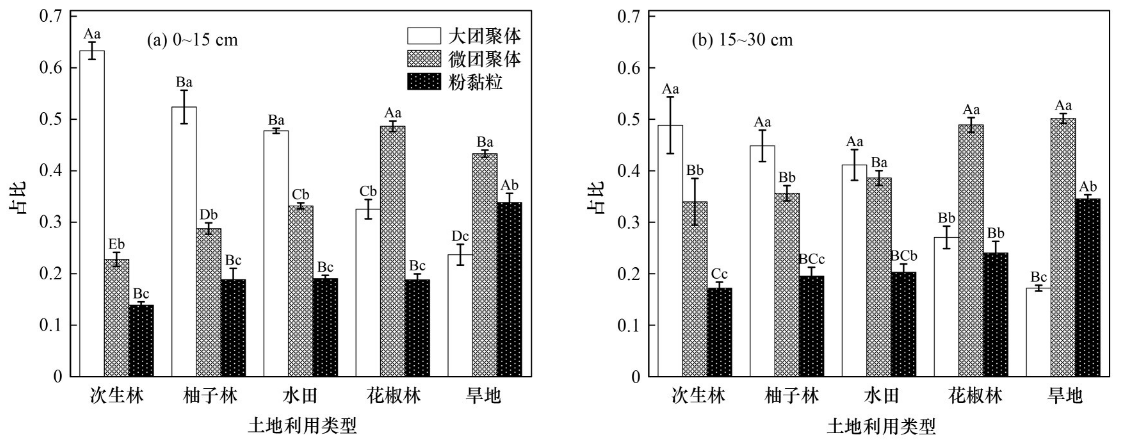
2.2 不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性的差异

如图3(a)所示，次生林表层和下层土壤的GMD值均显著大于其余4种土地利用方式，柚子林和水田的GMD值显著大于花椒林和旱地. 旱地下层土壤的GMD值显著小于其他4种土地利用方式. 各土地利用方式表层土壤的GMD值均显著大于下层土壤. 从两层土壤的平均值来看，次生林、柚子林、水田、花椒林和旱地下土壤团聚体GMD值分别为0.60、0.45、0.39、0.25和0.15 mm.

如图3(b)所示，次生林、柚子林和水田土壤表层和下层的MWD值均显著大于其余3种土地利用方式，旱地土壤的MWD值显著小于其他4种土地利用方式. 从两层土壤的平均值来看，次生林、柚子林、水田、花椒林和旱地下土壤团聚体MWD值分别为1.52、1.33、1.23、0.86和0.61 mm.

2.3 不同土地利用方式土壤团聚体和全土的SOC差异

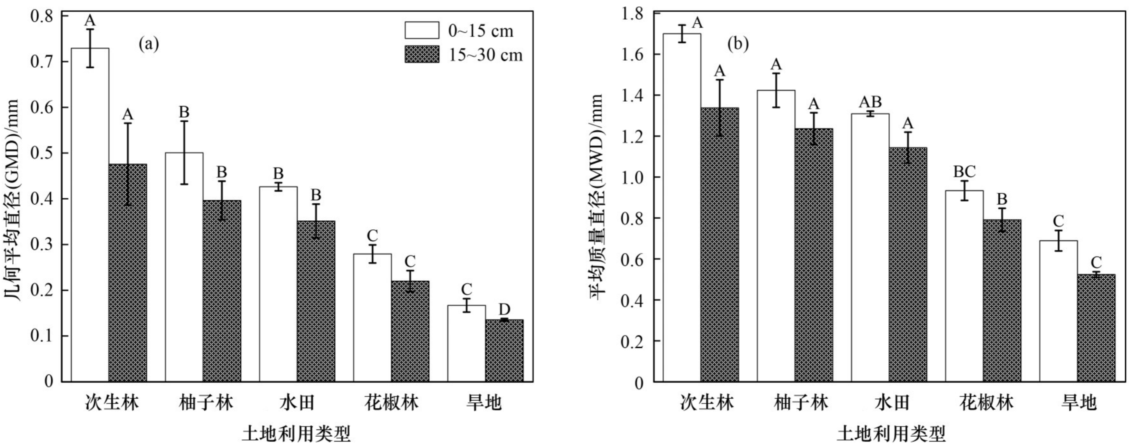
如图4所示，各土地利用方式下表层0 ~ 15 cm SOC含量大于下层土壤(15 ~ 30 cm). 表层土壤中，水田和次生林各团聚体和全土SOC含量均显著高于



不同大写字母表示不同土地利用方式下土壤团聚体粒径大小的差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一种土地利用方式下土壤团聚体粒径组分的差异显著($P<0.05$)

图2　不同土地利用方式下土壤团聚体分布差异

Fig. 2　Differences in particle size distribution of soil aggregates under different land use patterns



不同大写字母表示不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性GMD和MWD的显著差异($P<0.05$)

图3　不同土地利用方式下土壤团聚体几何平均直径(GMD)和平均质量直径(MWD)的特征

Fig. 3　Characteristics of geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) under different land use patterns

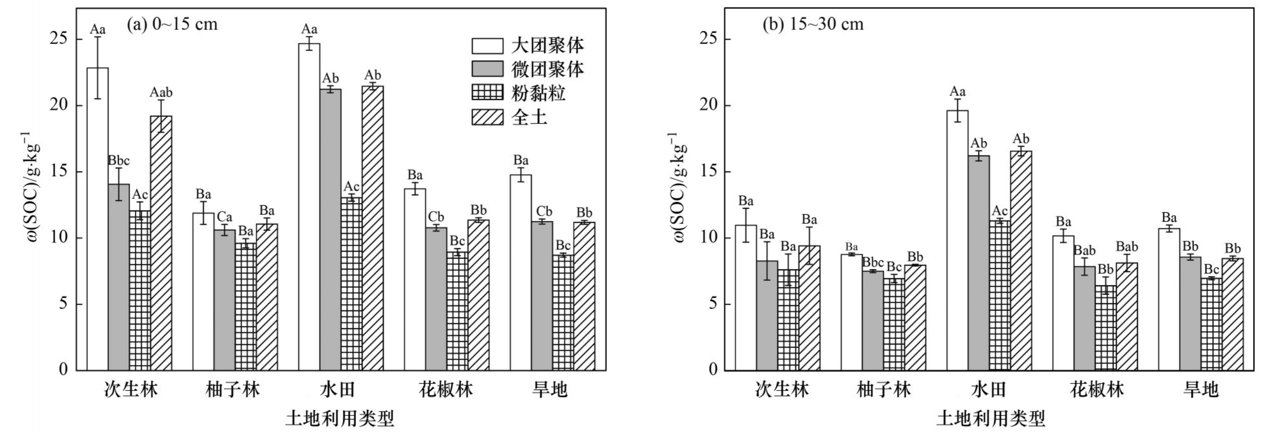
其他3种土地利用方式. 而在下层土壤中, 除水田各团聚体和全土SOC含量显著高于其余4种土地利用方式外, 其余4种土地利用方式之间各团聚体和全土SOC含量均无显著差异.

不同粒径团聚体之间, 表层0 ~ 15 cm和下层15 ~ 30 cm全土SOC含量均与微团聚体持平或略高于微团聚体(图4). 表层土壤中, 除柚子林外, 其余4种土地利用方式团聚体SOC含量均呈现出大团聚体>微团聚体>粉黏粒的变化趋势, 柚子林各团聚体及全土的SOC含量无显著差异. 下层土壤中, 柚子林、水田、花椒林和旱地的SOC含量均表现为: 大团聚体>微团聚体>粉黏粒, 次生林团聚体及全土的SOC含量无显著差异.

2.4　土地利用方式变化后各团聚体对全土SOC含量的贡献

当旱地转变为次生林和水田后表层(0 ~ 15 cm) SOC含量分别上升了8.06 $g\cdot kg^{-1}$和10.12 $g\cdot kg^{-1}$, 较旱地增幅达71.95%和90.34%(表1). 转变为柚子林后下降了0.14 $g\cdot kg^{-1}$, 转变为花椒林后上升了0.18 $g\cdot kg^{-1}$. 下层土壤(15 ~ 30 cm)中, 旱地转变为水田后SOC含量上升了8.11 $g\cdot kg^{-1}$, 较旱地增幅达53.73%, 在转变为次生林后只增加了0.96 $g\cdot kg^{-1}$, 而在转变为柚子林和花椒林后分别下降了0.50 $g\cdot kg^{-1}$和0.34 $g\cdot kg^{-1}$.

土地利用方式变化后不同粒径团聚体对全土SOC含量的贡献存在明显差异(表1). 当旱地转变为其他4种土地利用方式后, 两个土层的大团聚体均对SOC的增加有积极作用, 尤其是在次生林、柚子林和水田中; 在表层0 ~ 15 cm土壤中, 当旱地转变为水田和花椒林时, 微团聚体对全土SOC的含量的增加有积极作用, 而在下层15 ~ 30 cm土壤中, 只有旱地转变为水田时, 微团聚体对全土SOC的含量的增加有积极作用, 其他情况下, 微团聚体和粉黏粒在土地利用方式变化后对SOC含量的增加有消极作用.



不同大写字母表示不同土地利用方式下土壤有机碳(SOC)含量的显著差异($P<0.05$)；不同小写字母表示同一土地利用方式下不同粒径及全土的土壤有机碳(SOC)含量的显著差异($P<0.05$)

图4 不同土地利用方式下全土和土壤团聚体SOC的含量

Fig. 4 SOC content of bulk soil and soil aggregates under different land use patterns

表1 土地利用方式改变后不同粒径团聚体对全土SOC增加的作用[1)]/g·kg^{-1}

Table 1 Effect of different particle size aggregates on the increase in SOC after land use change /g·kg^{-1}

土层深度/cm	土地利用类变化	全土有机碳变化	ΔC		
			大团聚体	微团聚体	粉黏粒
0 ~ 15	旱地→次生林	8.06	10.97	-1.67	-1.27
	旱地→柚子林	-0.14	2.73	-1.83	-1.14
	旱地→水田	10.12	8.29	2.17	-0.46
	旱地→花椒林	0.18	0.97	0.37	-1.27
15 ~ 30	旱地→次生林	0.96	3.51	-1.49	-1.10
	旱地→柚子林	-0.50	2.09	-1.63	-1.05
	旱地→水田	8.11	6.23	1.96	-0.11
	旱地→花椒林	-0.34	0.91	-0.46	-0.87

1) ΔC表示土地利用方式改变后，不同粒径团聚体对全土中SOC变化的作用

2.5 土壤团聚体稳定性指标与SOC含量的相关性

由图5可知，大团聚体含量与微团聚体及粉黏粒的含量均呈极显著负相关($P<0.001$)，与GMD和MWD呈极显著正相关($P<0.001$)；微团聚体含量与粉黏粒的含量呈极显著正相关($P<0.001$)，与GMD和MWD呈极显著负相关($P<0.001$)；粉黏粒含量与GMD和MWD呈极显著负相关($P<0.001$). GMD和MWD呈极显著正相关($P<0.001$).

大团聚体、微团聚体、粉黏粒及全土中SOC含量互为极显著正相关($P<0.001$)，GMD和MWD与全土有机碳含量均呈极显著正相关($P<0.001$).

大团聚体含量与各团聚体以及全土的SOC含量呈显著正相关，其中，与全土以及粉黏粒SOC含量极显著正相关($P<0.001$). 微团聚体含量与粉黏粒和全土的有机碳的含量呈极显著负相关($P<0.001$).

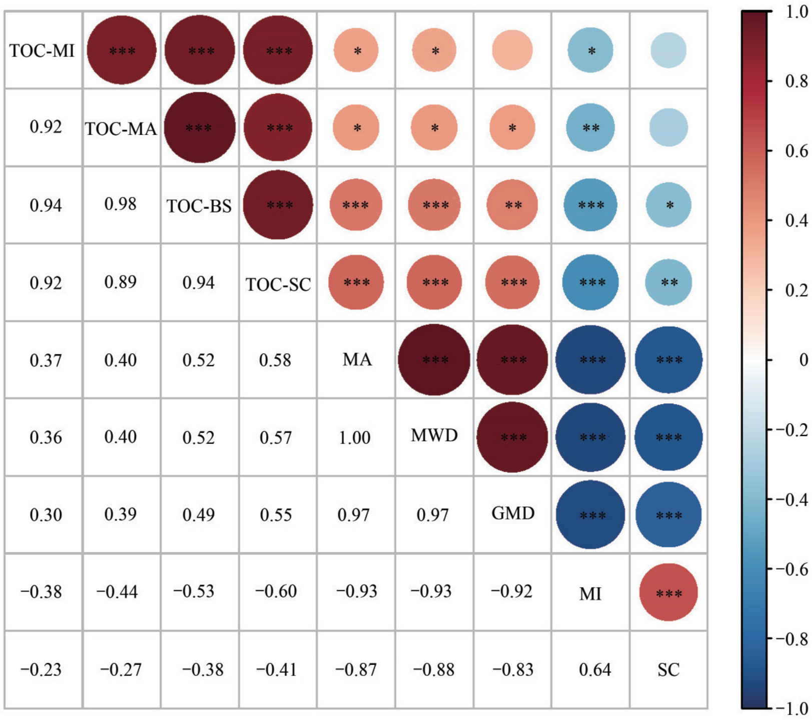
3 讨论

3.1 土地利用方式变化对土壤团聚体组分与稳定性的影响

土壤团聚体可以体现土壤结构的优劣[25]，大团聚体含量反映了土壤结构的稳定，是维持土壤生态系统服务功能的保障[26,27]. 本研究中，次生林土壤中大团聚体的含量为5种处理最高的一种，说明西南岩溶区的造林活动可以有效提高大团聚体的含量，这与An等[28]和Bai等[29]在我国黄土高原和亚热带地区关于造林活动可以改善土壤结构的研究结论一致，表明适度发展林业可以提升西南岩溶区的土壤质量.

岩溶区土壤团聚体的稳定性随土地利用方式改变而变化[30]. 本研究发现水田大团聚体含量为47.77%，而旱地仅为23.70%，表明旱地周期性的机械耕作会破坏大团聚体并产生更多的粉黏粒[31]，水田耕作则促进了土壤大团聚体的形成[32]. 研究区内水稻单季种植，旱地双季种植，水田耕作强度更低，稻田休耕有利于土壤大团聚体的形成，从而显著增加土壤团聚体的稳定性[33]，维持和保护了土壤结构的稳定，与Zhao等[34]关于耕作强度与土壤团聚体粒径组分的关系的研究结论相一致，即耕作强度和田间管理措施对土壤结构有较大影响.

本研究中，水田的大团聚体含量和GMD、



MA、MI 和 SC 分别为大团聚体、微团聚体和粉粒和黏粒在全土中所占的比例，GMD 为几何平均直径，MWD 为平均质量直径；TOC-MA、TOC-MI、TOC-SC 和 TOC-BS 分别为大团聚体、微团聚体、粉粒和黏粒以及全土中土壤有机碳（SOC）含量；数值大小表示相关性指数，正值表示正相关，负值表示负相关；*、**和***分别表示在 $P < 0.05$、$P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平上显著相关

图 5　土壤团聚体稳定性指标与有机碳含量的相关性

Fig. 5　Correlations between soil aggregate stability indices and SOC content

MWD 均显著高于旱地，通过走访农户得知，水田使用复合肥和粪水配施．在中国南方地区，长期采用化肥和有机肥配施显著提高了农田土壤团聚体的稳定性[35~37]．

3.2　不同土地利用方式下团聚体有机碳含量的变化及其对全土有机碳含量的贡献

通过相关性分析发现，大团聚体含量与全土有机碳含量呈极显著正相关，而微团聚体和粉黏粒含量与全土的有机碳含量均呈显著负相关．表明植被恢复可以促进有机碳从微团聚体向大团聚体转移[38,39]，大团聚体可以储存更多的土壤有机质[40]．有机碳的储存过程与团聚体的粒径大小密切相关[41]，大团聚体中的颗粒有机碳和矿物结合有机碳在 SOC 的积累中发挥作用[42]，石灰土中富含的钙离子可以链接团聚体表面和 SOC[43]．由此可见，岩溶地区土壤中大团聚体是 SOC 储存过程中最积极的参与者，提高土壤大团聚体的含量有利于土壤碳汇潜力的提升．

本研究中，GMD 和 MWD 与全土中有机碳的含量显著正相关，这与邓华等[44]的研究结果一致，即 SOC 的含量随团聚体稳定性的增加而增加．然而本研究发现，虽然表层土壤中水田和次生林各团聚体以及全土的有机碳含量均显著高于其他土地利用方式，但下层土壤中只有水田的 SOC 含量显著高于其他，说明水田土壤中碳的储存过程与其他土地利用方式不同[45]．水田在耕作过程中向土壤输送了有机肥和秸秆等有机质，长期的水稻种植可以物理保护土壤中的活性有机碳以提高土壤的生物活性[31,33]，更高的微生物活性有助于残留的微生物通过附着团聚体以固定 SOC[46]，促进土壤中有机碳含量增加；稻田特有的水耕熟化机制会导致土壤中生成固相的 Fe(Ⅱ) 矿物，这类含铁矿物及其络合物能够吸附有机碳，从而提高 SOC 含量[15]；水田相较于旱地耕作对土壤扰动更少，比翻耕处理下的旱地 SOC 含量高[47]．由此可见，岩溶区水田相较旱地能储存更多 SOC．

本研究发现花椒林土壤中大团聚体的含量显著低于另外 2 种林地和水田，GMD 和 MWD 值反映出花椒林土壤的稳定性已经遭到破坏，SOC 的含量也较低．花椒为岩溶区重要的经济作物，种植历史长，土地利用强度大，真菌等微生物的分泌物抑制了团聚体的形成[48]，土壤碳的矿化量增加，降低了 SOC 的稳定性[49,50]，目前当地花椒产量明显降低，土壤质量下降显著，因此西南岩溶区的花椒种植需要加强田间管理以确保种植效率和土壤健康．

4　结论

（1）西南岩溶区土地利用方式变化对土壤团聚体粒径分布及稳定性影响显著．旱地转变为林地和水田的过程显著提高了土壤大团聚体的含量和团聚

体稳定性，适度发展林业可以优化西南岩溶区的土壤结构.

(2)表层土壤中，次生林和水田的有机碳含量显著高于其他土地利用方式，下层土壤中，只有水田的有机碳含量显著高于其他.综合考虑，水田耕作有利于西南岩溶区粮食安全的保证和SOC的储存.

(3)根据相关性分析，大团聚体含量与土壤各组分有机碳含量呈显著正相关，微团聚体、粉黏粒与土壤各组分有机碳含量呈显著负相关，土壤大团聚体对SOC的储存有积极作用，保护土壤大团聚体有利于提高西南岩溶区土壤碳汇潜力.

参考文献：

[1] 朱永官，李刚，张甘霖，等.土壤安全：从地球关键带到生态系统服务[J].地理学报，2015，**70**(12)：1859-1869.
Zhu Y G, Li G, Zhang G L, *et al*. Soil security: from earth's critical zone to ecosystem services[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(12): 1859-1869.

[2] 袁道先.我国岩溶资源环境领域的创新问题[J].中国岩溶，2015，**34**(2)：98-100.
Yuan D X. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. Carsologica Sinica, 2015, **34**(2): 98-100.

[3] Shukla P R, Skea J, Slade R, *et al*. Technical Summary, 2019 [A]. In: Shukla P R, Skea J, Calvo Buendia E, et al (Eds.). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems[C]. 2019-08.

[4] 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.
Dou S, Li K, Guan S, *et al*. A review on organic matter in soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, **48**(2): 412-418.

[5] Novelli L E, Caviglia O P, Wilson M G, *et al*. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a vertisol and a mollisol[J]. Geoderma, 2013, **195-196**: 260-267.

[6] Kasper M, Buchan G D, Mentler A, *et al*. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **105**(2): 192-199.

[7] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, **124**(1-2): 3-22.

[8] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al*. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, **241**(2): 155-176.

[9] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, **79**(1): 9-16.

[10] 瞿晴，徐红伟，吴旋，等.黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J].环境科学，2019，**40**(6)：2904-2911.
Qu Q, Xu H W, Wu X, *et al*. Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in robinia pseudoacacia forest within different vegetation zones on the loess plateau, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2904-2911.

[11] John B, Yamashita T, Ludwig B, *et al*. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. Geoderma, 2005, **128**(1-2): 63-79.

[12] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al*. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(2): 681-689.

[13] 谢钧宇，曹寒冰，孟会生，等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持学报，2020，**34**(3)：274-281，290.
Xie J Y, Cao H B, Meng H S, *et al*. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(3): 274-281, 290.

[14] 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.

[15] 龙健，廖洪凯，李娟，等.基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究[J].环境科学，2012，**33**(6)：2131-2138.
Long J, Liao H K, Li J, *et al*. Relationships between soil and rocky desertification in typical karst mountain area based on redundancy analysis[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 2131-2138.

[16] Banwart S A, Nikolaidis N P, Zhu Y G, *et al*. Soil functions: connecting earth's critical zone[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, **47**: 333-359.

[17] 王克林，岳跃民，陈洪松，等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报，2019，**39**(20)：7432-7440.
Wang K L, Yue Y M, Chen H S, *et al*. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(20): 7432-7440.

[18] 姚平，陈先刚，周永锋，等.西南地区退耕还林工程主要林分50年碳汇潜力[J].生态学报，2014，**34**(11)：3025-3037.
Yao P, Chen X G, Zhou Y F, *et al*. Carbon sequestration potential of the major stands under the grain for green program in Southwest China in the next 50 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(11): 3025-3037.

[19] 刘亚龙，王萍，汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制：研究进展与展望[J].土壤学报，2023，**60**(3)：627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, **60**(3): 627-643.

[20] Yu P J, Li Y X, Liu S W, *et al*. The quantity and stability of soil organic carbon following vegetation degradation in a salt-affected region of Northeastern China[J]. CATENA, 2022, **211**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105984.

[21] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, **50**(3): 627-633.

[22] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, **33**(2): 141-163.

[23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京：中国农业出版社，2000.

[24] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution[A]. In: Klute A (Ed.). Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods (2nd ed.)[C]. Soil Science Society of America, 1986. 425-442.

[25] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(14): 2099-2103.

[26] 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.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil

aggregate and influencing factors [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, **36**(6): 415-421.

[27] Morris E K, Morris D J P, Vogt S, *et al*. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. The ISME Journal, 2019, **13**(7): 1639-1646.

[28] 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**: 75-85.

[29] Bai Y X, Zhou Y C, He H Z. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China [J]. Geoderma, 2020, **376**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114548.

[30] 何宇，盛茂银，王轲，等．土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及C、N、P化学计量特征的影响[J]. 环境科学，2022，**43**(7)：3752-3762.
He Y, Sheng M Y, Wang K, *et al*. Effects of land use change on constitution, stability, and C, N, P stoichiometric characteristics of soil aggregates in Southwest China karst [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3752-3762.

[31] Zhong Z K, Wu S J, Lu X Q, *et al*. Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China [J]. CATENA, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104867.

[32] Liu Y L, Wang P, Ding Y J, *et al*. Microbial activity promoted with organic carbon accumulation in macroaggregates of paddy soils under long-term rice cultivation [J]. Biogeosciences, 2016, **13** (24): 6565-6586.

[33] 王志强，刘英，杨文亭，等．稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 土壤学报，2018，**55**(5)：1143-1155.
Wang Z Q, Liu Y, Yang W T, *et al*. Effects of rotation and fallow in paddy field on distribution and stability of soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(5): 1143-1155.

[34] Zhao J S, Chen S, Hu R G, *et al*. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides [J]. Soil and Tillage Research, 2017, **167**: 73-79.

[35] Guo Z L, Zhang L C, Yang W, *et al*. Aggregate stability under long-term fertilization practices: the case of eroded ultisols of south-central China [J]. Sustainability, 2019, **11** (4), doi: 10.3390/su11041169.

[36] Mustafa A, Xu M G, Shah S A A, *et al*. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **270**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110894.

[37] Karami A, Homaee M, Afzalinia S, *et al*. Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **148**: 22-28.

[38] Yang J J, Li A Y, Yang Y F, *et al*. Soil organic carbon stability under natural and anthropogenic-induced perturbations [J]. Earth-Science Reviews, 2020, **205**, doi: 10.1016/j. earscirev. 2020. 103199.

[39] 王兴，钟泽坤，张欣怡，等．长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. 环境科学，2020，**41**(5)：2416-2424.
Wang X, Zhong Z K, Zhang X Y, *et al*. Relationship between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2416-2424.

[40] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, *et al*. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales [J]. Geoderma, 2019, **333**: 149-162.

[41] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. Nature, 2015, **528**(7580): 60-68.

[42] Zhao Z H, Mao Y L, Gao S F, *et al*. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice-wheat cropping system [J]. Scientific Reports, 2023, **13**, doi: 10.1038/s41598-023-30541-y.

[43] Briedis C, De Moraes Sá J C, Caires E F, *et al*. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system [J]. Geoderma, 2012, **170**: 80-88.

[44] 邓华，高明，龙翼，等．生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. 环境科学，2021，**42**(11)：5481-5490.
Deng H, Gao M, Long Y, *et al*. Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5481-5490.

[45] Atere C T, Gunina A, Zhu Z K, *et al*. Organic matter stabilization in aggregates and density fractions in paddy soil depending on long-term fertilization: tracing of pathways by ^{13}C natural abundance [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, **149**, doi: 10.1016/j.soilbio. 2020.107931.

[46] Kan Z R, Liu W X, Liu W S, *et al*. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: a global synthesis and perspective [J]. Global Change Biology, 2022, **28**(3): 693-710.

[47] 刘红梅，李睿颖，高晶晶，等．保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. 生态环境学报，2020，**29**(6)：1277-1284.
Liu H M, Li R Y, Gao J J, *et al*. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29** (6): 1277-1284.

[48] Tang J, Mo Y H, Zhang J Y, *et al*. Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability [J]. Applied Soil Ecology, 2011, **47** (3): 153-159.

[49] 张文娟，廖洪凯，龙健，等．种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学，2015，**36**(3)：1053-1059.
Zhang W J, Liao H K, Long J, *et al*. Effects of Chinese prickly ash orchard on soil organic carbon mineralization and labile organic carbon in karst rocky desertification region of Guizhou Province [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1053-1059.

[50] Liao H K, Long J, Li J. Conversion of cropland to Chinese prickly ash orchard affects soil organic carbon dynamics in a karst region of southwest China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, **104**(1): 15-23.

HUANJING KEXUE Vol. 45 No. 5

Environmental Science (monthly) May 15, 2024

CONTENTS