DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.008 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.008
郑荣芳, 夏栋, 康东, 等. 不同种植年限对鄂西低山丘陵区柑橘园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):138-149.
Zheng Rongfang, Xia Dong, Kang Dong, et al. Influence of different planting years on soil aggregates and organic carbon distribution in citrus orchards of low mountain and hilly areas in western Hubei[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):138-149.

不同种植年限对鄂西低山丘陵区柑橘园土壤团聚体及其有机碳分布的影响

郑荣芳[1,2], 夏 栋[1,2], 康 东[1,2], 高 洋[1,3], 陈海林[1,3], 王绍蔚[1,2], 卢 星[1,2], 柳小晶[1], 许 阳[1,2], 吴 彬[1,2], 陈红凤[2]
(1.水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;
2.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:[**目的**]探究鄂西低山丘陵区旱地转为柑橘园后,土壤团聚体稳定性与土壤有机碳(SOC)固存效应对种植年限的动态响应规律,为鄂西地区土地利用类型合理转变以及农业土壤固碳减排研究提供科学依据。[**方法**]采用空间代替时间方法,选取不同种植年限(D_7,D_{10},D_{12},D_{16},D_{20},D_{30},D_{40}),以持续玉米耕种旱地(D_0)作为对照,对不同土层深度(0—10,10—20,20—40,40—60 cm)土壤样品进行团聚体组成、稳定性及有机碳特征的分析。[**结果**](1)旱地改种柑橘初期(0~7 a),土壤团聚体稳定性($R_{0.25}$,MWD,GMD)和SOC储量较旱地相比分别降低28.61%,63.8%,67.9%和7.41%,随种植年限增加,团聚体稳定性和SOC储量均表现出缓慢上升趋势,与旱地相比,表层各指标上升幅度分别为0.65%,25.75%,30.82%和1.95%。(2)团聚体稳定性与SOC含量均随土层加深呈显著递减趋势,改善效应集中体现在0—20 cm耕作层,SOC表现为表层积累。(3)相关性分析表明,>5 mm大团聚体的SOC贡献率及富集系数与$R_{0.25}$,MWD,GMD均呈显著正相关($p<0.05$)。[**结论**]旱地转为长期柑橘种植通过促进SOC向大团聚体富集,形成了团聚体与SOC协同促进的正反馈循环,证实旱地转为柑橘园的长期种植可以使土壤性质得到改善,但其改善效应存在表层积累性和缓慢性,建议在集约化管理中聚焦于增强深层土壤碳的输入与物理保护。

关键词:柑橘园; 种植年限; 土壤团聚体; 有机碳; 土层
中图分类号:S152.4^{+}81; S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0138-12

Influence of different planting years on soil aggregates and organic carbon distribution in citrus orchards of low mountain and hilly areas in western Hubei

Zheng Rongfang[1,2], Xia Dong[1,2], Kang Dong[1,2], Gao Yang[1,3], Chen Hailin[1,3], Wang Shaowei[1,2], Lu Xing[1,2], Liu Xiaojing[1], Xu Yang[1,2], Wu Bin[1,2], Chen Hongfeng[2]
(1.*Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using Cement-based Materials* (*China Three Gorges University*), *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 2.*College of Hydraulic & Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 3.*College of Biological & Pharmaceutical Sciences*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*)

Abstract: [**Objective**] To explore the dynamic response patterns of soil aggregate stability and soil organic carbon (SOC) storage efficiency to the planting duration after converting dry land to citrus orchards in the low mountain and hilly areas of western Hubei Province, and to provide a scientific basis for the rational transformation

收稿日期:2026-01-19 **修回日期:**2026-02-16 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目"鄂西低山丘陵区土地利用转变及年限对橘园土壤团聚体及碳库特征影响研究"(B2022035)
第一作者:郑荣芳(2002—),女,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为土壤团聚体和有机碳。E-mail:2539817680@qq.com
通信作者:夏栋(1985—),男,湖北黄冈人,博士,副教授,主要从事生态修复与水土保持研究。E-mail:xiadongsanxia@163.com

of land use types and the research on carbon sequestration and emission reduction in agricultural soils in the western Hubei region. [**Methods**] Using a space-for-time substitution method, citrus orchards with different planting years (D_7, D_{10}, D_{12}, D_{16}, D_{20}, D_{30}, D_{40}) were selected, with continuous corn cultivation in dry land (D_0) as the control. The aggregate composition, stability, and organic carbon characteristics of soil samples at different soil layer depths (0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm) were analyzed. [**Results**] (1) In the initial stage of converting dry land to citrus cultivation (0～7 years), the stability of soil aggregates ($R_{0.25}$, MWD, GMD) and SOC storage decreased by 28.61%, 63.8%, 67.9%, and 7.41%, respectively, compared to the dry land. As the planting years increased, the stability of soil aggregates and SOC storage showed a slow upward trend. Compared to the dry land, the increase in each index in the surface layer was 0.65%, 25.75%, 30.82% and 1.95%, respectively. (2) Both the aggregate stability and SOC content showed a significant decreasing trend with the deepening of soil layers. Improvements were mainly concentrated in the 0—20 cm plough layer, and SOC exhibited clear surface accumulation. (3) Correlation analysis indicated that the SOC contribution rate and enrichment coefficient of >5 mm macro-aggregates were significantly positively correlated with $R_{0.25}$, MWD, and GMD ($p<0.05$). [**Conclusion**] The transformation of dry land into long-term citrus cultivation promotes the enrichment of SOC in large aggregates, forming a positive feedback loop where aggregates and SOC work in synergy. This confirms that the long-term cultivation of dry land into citrus orchards improves soil properties. However, the improvement effect is characterized by surface accumulation and slow growth. Therefore, it is suggested that in intensive management, efforts should be focused on enhancing carbon inputs and physical protection of deeper soils.

Keywords: citrus orchard; planting years; soil aggregates; organic carbon; soil layer

在全球气候变化与粮食安全双重挑战下,土地利用和覆被变化已成为驱动陆地生态系统演变最活跃的因素之一[1]。其中,旱作农地转为果园作为我国南方丘陵区常见的土地利用转换类型,通过改变植被类型[2]、根系分布[3]及人为管理措施[4],重塑了土壤团聚体结构并影响有机碳(SOC)的积累与稳定性。柑橘作为该区域农业经济的支柱产业,对促进乡村振兴与区域农业发展发挥着战略作用[5]。在这种农业产业结构优化与市场需求的双重影响下,旱地陆续转为柑橘园[5]。这一转变在重构地表植被与耕作制度的同时,也影响着地下土壤生态系统[6]。因此,从土壤结构与固碳角度评估其长期效应,是优化区域土地利用与管理的科学前提。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元[7],其粒径组成与稳定性直接反映土壤质量。土壤SOC作为团聚体形成的关键胶结物质[8],同时依赖于团聚体的物理保护实现固持与稳定。二者的协同作用在提升土壤抗侵蚀能力、养分供给及生态系统稳定性方面发挥着决定性作用[4]。以往研究发现,旱作农地转化为果园会通过多年生植被的根系固结与凋落物归还促进大团聚体形成并固碳[2],但伴随的耕作等集约管理又会破坏结构、促使碳向不稳定的微团聚体迁移[9]。这种复杂的正负效应在不同作物类型与区域的研究中也呈现差异化特征。黄土高原南部沟壑区的小麦-玉米轮作地转变为果园后,长期集约管理的累积效应显著削弱了土壤团聚作用和碳固持能力[10];赣南丘陵区脐橙种植相较于传统旱地种植则具有更好的土壤肥力、团聚体结构和碳储量[2]。不同区域气候和土壤条件下,柑橘种植对团聚体及碳固持的影响效应可能存在差异,然而目前针对鄂西地区的橘园研究多集中于果实品质[11]或土壤微生物活性等[12]方面,对从团聚体和SOC的角度评估鄂西地区旱地改种柑橘这一方式土壤质量的研究仍相对较少。

因此,本试验以湖北省枝江市旱地转种柑橘序列样地为对象。采用时空替代法,分析不同种植年限和不同土层的团聚体组成、稳定性以及各粒级团聚体SOC含量特征,进一步明确各粒级团聚体SOC富集和贡献率。采用线性回归分析团聚体稳定性和土壤SOC储量与种植年限之间的关系,热图分析团聚体稳定性与各粒级团聚体SOC含量、富集系数及贡献率之间的关系,揭示旱地转为柑橘园后土壤团聚体与SOC的变化规律,旨在为我国鄂西地区土地利用类型合理转变以及农业土壤固碳减排研究提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于湖北省枝江市安福寺镇柑橘种植区

(111°35′E,30°32′N),属典型的亚热带季风气候区,年均降水量达1 041.8 mm,平均气温16.9 ℃。试验区柑橘园占地总面积为28.67 hm^2,其中柑橘种植面积为25 hm^2。区域成土母质为第四纪河流沉积物,土壤类型为黄棕壤,质地以壤土为主。选取由传统玉米旱地转为集约化经营柑橘园的不同年限样地为研究对象,为了覆盖柑橘园生命周期的关键阶段,选取旱地转种柑橘年限分别为7,10,12,16,20,30,40 a,分别标记为D_7,D_{10},D_{12},D_{16},D_{20},D_{30},D_{40}。基于时空替代法的现实可行性[13],所有选定样地地理位置相邻,成土母质相同,土层深厚且均一;地形条件一致,均为坡度小于15°的连续阳坡;转种前土地利用方式与耕作历史相同(均为玉米旱作,以雨养为主,辅以人工灌溉,施肥以化肥和有机肥结合);转种后均为宜昌蜜橘(*Citrus ichangensis*)单一品种,并采用统一的人工种植与集约化管理模式(包括相似的化肥与有机肥施用量、行间定期除草、无深翻耕作等)。对照组为持续进行玉米耕种的旱地,位于柑橘园邻近区域,标记为D_0,其成土母质、地形、土壤类型及历史管理方式与各柑橘样地转种前的状态基本一致。所有样地地理位置紧密相邻,其气候、水文等区域微环境条件高度一致。各样地的土壤基本理化性状见表1。

表1 不同样地土壤基本理化性状

Table 1 Basic soil physical and chemical properties of different plots

样地	容重/(g·cm^{-3})	含水率/%	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(mg·kg^{-1})
D_0	1.42	3.58	1.05	0.27	10.61
D_7	1.34	2.93	1.26	1.12	18.58
D_{10}	1.37	3.33	1.06	0.4	16.14
D_{12}	1.36	3.18	0.95	0.28	18.13
D_{16}	1.33	3.18	0.98	0.42	13.66
D_{20}	1.32	3	0.92	0.49	14.43
D_{30}	1.29	3.85	0.97	0.34	12.94
D_{40}	1.3	3.78	0.85	0.43	15

1.2 样品采集

2024年4月采用"S"形五点采样法,在8个试验样地内分别设置3个10 m×10 m样区,研究样区按照邻近原则进行布置。在每个样区布设5个采样点,大小约为50 cm×50 cm,清除样方地表凋落叶与腐殖质层后,用不锈钢铲从每个采样点分别采集0—10 cm(S_1),10—20 cm(S_2),20—40 cm(S_3)和40—60 cm(S_4)4个土层的剖面垂直面采集原状土样。去除肉眼可见的砾石、植物残体、根系和土壤动物,将5个采样点同一土层的土样作为该样区的土壤样品,待土样采集完毕后将土填回,恢复样地原貌。将样品带回实验室后自然风干,用于后续团聚体含量和SOC的测定。

1.3 土壤指标测定方法

土壤团聚体分级方法采用湿筛法[14],具体操作:称取风干土样50.00 g于5 mm筛上,在室温下用蒸馏水浸润5 min,利用自动振荡筛(套筛直径为5,2,1,0.5,0.25,0.053 mm),以30次/min速度在蒸馏水中振荡30 min,上下振幅为3 cm,将各筛上的团聚体样品用蒸馏水冲洗至烧杯中,获得粒级分别为>5,2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5,0.053~0.25 mm的水稳性团聚体,将<0.053 mm水稳性团聚体在桶内沉降48 h,用虹吸管吸除上清液后,剩余团聚体转至烧杯中。将所有盛有团聚体的烧杯置于50 ℃烘箱中烘干至恒重,并称重记录,计算各粒级的质量分数。各粒级团聚体以及其余风干土壤样品经磨细过0.15 mm筛后,采用重铬酸钾外加热法测定各粒级团聚体SOC及全土SOC含量[15]。

1.4 数据处理与分析

土壤水稳性团聚体稳定性[16]采用平均重量直径(MWD),对几何平均直径(GMD)以及粒径大于0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$)进行分析,计算公式如下:

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}\bar{x}_i\omega_i \tag{1}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\left(\sum_{i=1}^{n}\omega_i\ln\bar{x}_i\right) \tag{2}$$

$$R_{0.25}=\frac{M_{i>0.25}}{M_T}\times 100\% \tag{3}$$

式中:MWD为平均重量直径(mm);GMD为几何平均直径(mm);n为粒径分组的组数;$\bar{x}_i$为第i粒级土壤团聚体平均直径(mm);ω_i为第i粒级土壤团聚体所占百分比(%);$R_{0.25}$为土壤粒径大于0.25 mm团聚体含量(%);$M_{i>0.25}$为大于0.25粒径土壤团聚体质量之和(g);M_T为各粒径土壤团聚体质量之和(g)。

各粒径团聚体对土壤SOC的富集系数(EF)和贡献率(CR)计算公式[17]如下:

$$\mathrm{EF}=\frac{a_i}{c} \tag{4}$$

$$\mathrm{CR}=\frac{a_i b_i}{c}\times 100\% \tag{5}$$

式中:EF为富集系数;CR为贡献率(%);a_i为第i级粒径团聚体有机碳含量(g/kg);b_i为第i级粒径团聚体含量(g/kg);c为土壤有机碳含量(g/kg)。

本研究所有试验数据整理和计算均使用Excel进行,采用SPSS 26.0进行单因素方差分析(ANOVA,显著性水平$p<0.05$)及事后多重比较(LSD法、邓肯法和沃勒-邓肯法),相关性分析及所有作图均使用Origin 2024软件完成。

2　结果与分析

2.1　土壤团聚体组成及稳定性

不同种植年限下各土层各粒级团聚体占比如图1所示。土壤以＞0.25 mm的团聚体为主,其中＞2 mm的大团聚体质量分数随种植年限延长整体呈现先升后稳的趋势;在不同种植年限下,＞2 mm的团聚体在各土层的平均占比在7.48%～33.81%波动,0.25～2 mm的团聚体在各土层的平均占比在44.78%～55.15%波动,＜0.25 mm的团聚体在各土层的平均占比在21.05%～43.89%波动。

表层团聚体占比随粒径的降低呈先降后升然后趋于稳定的趋势,其他土层团聚体占比随粒径的降低呈先波动中缓升后波动中下降至稳定的趋势,各样地＞2 mm团聚体比例随土层的加深呈显著递减趋势,大粒级团聚体在表层聚集,而小、微粒级团聚体则更多聚集于深层土壤;D_{30}样地的表层土壤＞2 mm的团聚体显著高于对照组D_0样地,高出值为15.33%,D_7和D_{20}样地显著低于D_0样地,分别为10.52%和27.66%。

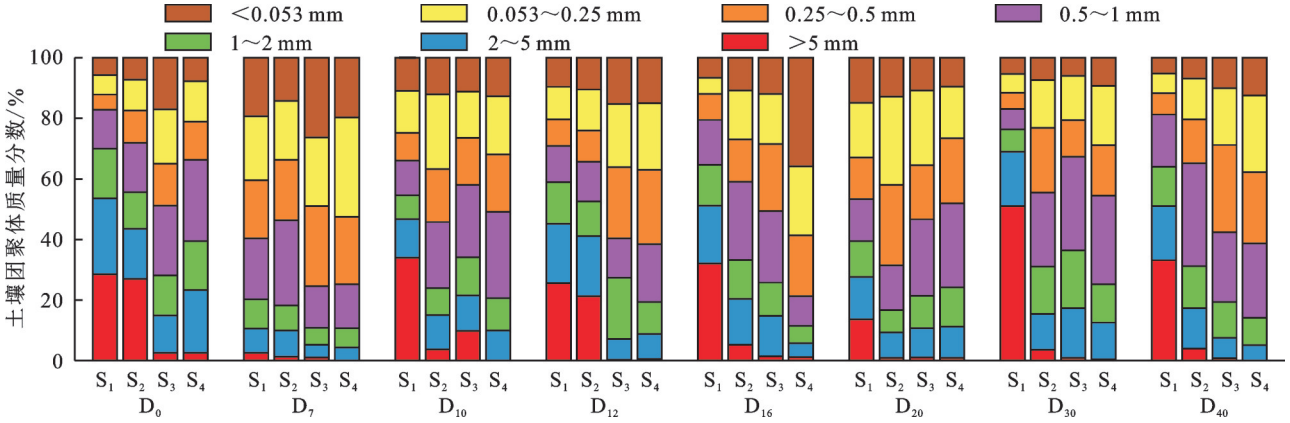


图1　不同种植年限下土壤水稳性团聚体组成特征

Fig. 1　Composition characteristics of soil water-stable aggregates under different planting years

由表2可知,湿筛后各样地土壤在不同土层深度的$R_{0.25}$有明显不同,变化范围为41.41%～88.43%;历经多年种植后$R_{0.25}$含量在波动中逐渐上升至稳定,各样地$R_{0.25}$含量的平均值在56.11%～78.96%;随着土层的加深,各样地$R_{0.25}$含量呈现显著的下降趋势,各土层的平均值分别为79.29%,71.98%,67.52%和63.23%,其中表层0—10 cm土壤的$R_{0.25}$含量波动较大,波动范围为59.56%～88.43%。

表2　不同种植年限下土壤团聚体$R_{0.25}$含量

Table 2　Soil aggregate $R_{0.25}$ content under different planting years

样地/土层	大团聚体含量$R_{0.25}$			
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
D_0	87.87±0.02Aa	82.57±0.01Ba	65±0.03Dcd	78.93±0.00Ca
D_7	59.56±0.08Ae	66.33±0.02Ae	51.04±0.09Be	47.51±0.04Be
D_{10}	75.25±0.00Ac	63.26±0.03Cf	73.54±0.00Aab	68.15±0.02Bc
D_{12}	79.66±0.01Ab	76.01±0.02Ac	63.88±0.12Bd	63.04±0.02Bd
D_{16}	88.06±0.03Aa	73.06±0.02Bd	71.55±0.02Bbc	41.41±0.06Cf
D_{20}	67.1±0.05Bd	58±0.00Cg	64.51±0.02Bcd	73.45±0.04Ab
D_{30}	88.43±0.01Aa	76.86±0.00Bc	79.44±0.01Ba	71.09±0.04Cbc
D_{40}	88.38±0.01Aa	79.73±0.01Bb	71.21±0.02Cbc	62.25±0.01Dd

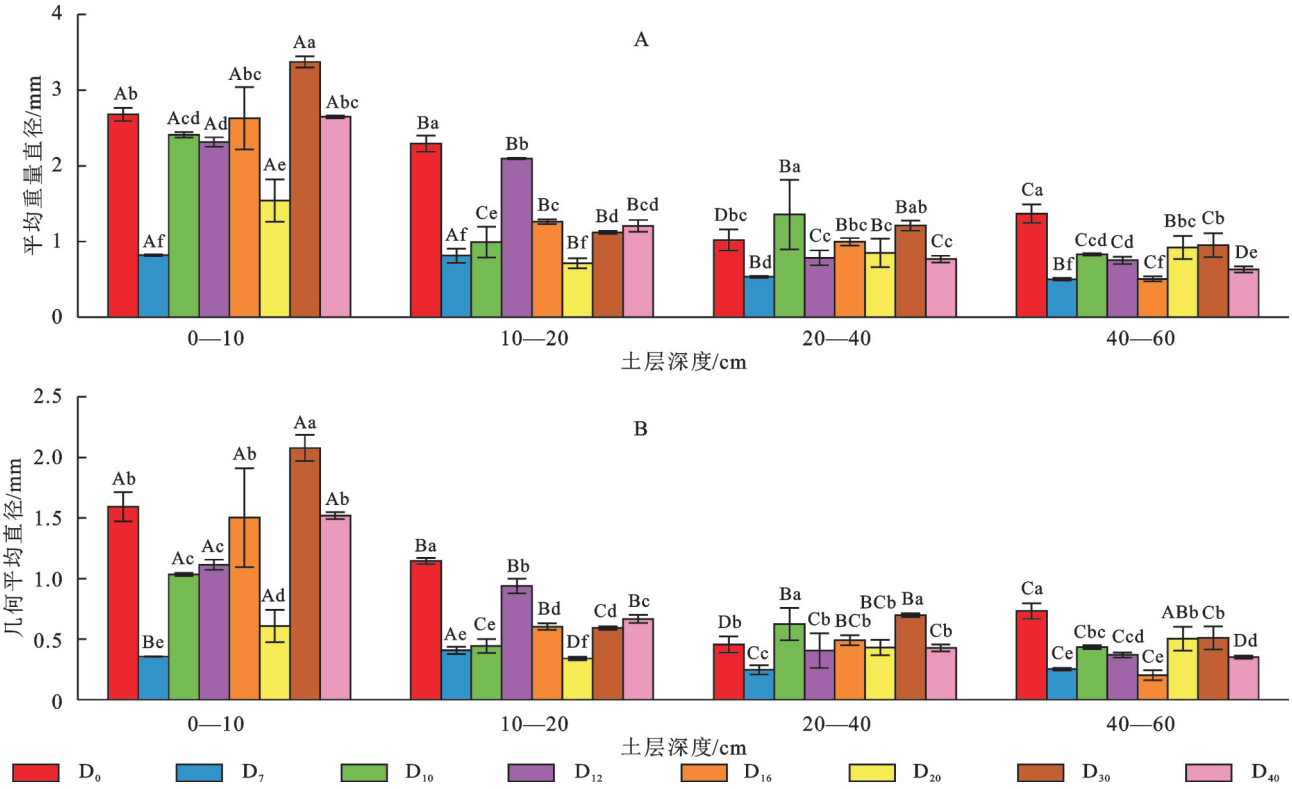
注:小写字母表示相同土层不同样地间差异显著($p<0.05$),大写字母表示相同样地不同土层间差异显著($p<0.05$)。

不同种植年限下土壤MWD和GMD如图2所示。随种植年限增长,各样地MWD和GMD的平均值均先呈上升趋势后在1.01～1.66 mm和0.47～0.97 mm之间波动;各种植年限下MWD和GMD均随土层加深呈递减趋势,变化范围分别为0.5～3.37 mm和0.25～2.08 mm,其中D_{30}样地MWD和GMD值在0—10 cm土层中明显高于对照组D_0,高出值分别为0.69,0.49,而D_7和D_{20}样地在各土层中都表现出较差的团聚体稳定性。

2.2　土壤有机碳

如图3所示,不同种植年限SOC含量存在明显差异,随着植橘时间增加,SOC含量先增加后在波动中趋于稳定,与D_0相比,D_{16}样地显著增加了SOC含量,各土层平均增幅为0.9%,在柑橘种植16 a后

SOC储量达到动态平衡;同一种植年限下,SOC含量随土层的加深而显著递减,且递减的幅度随着种植年限的增大而缩小,其中,40—60 cm土层的SOC含量已无显著差异。



注:小写字母表示相同土层不同样地间差异显著($p<0.05$),大写字母表示相同样地不同土层间差异显著($p<0.05$),下同。

图2 不同种植年限下土壤团聚体稳定性特征

Fig. 2 Stability characteristics of soil aggregates under different planting years

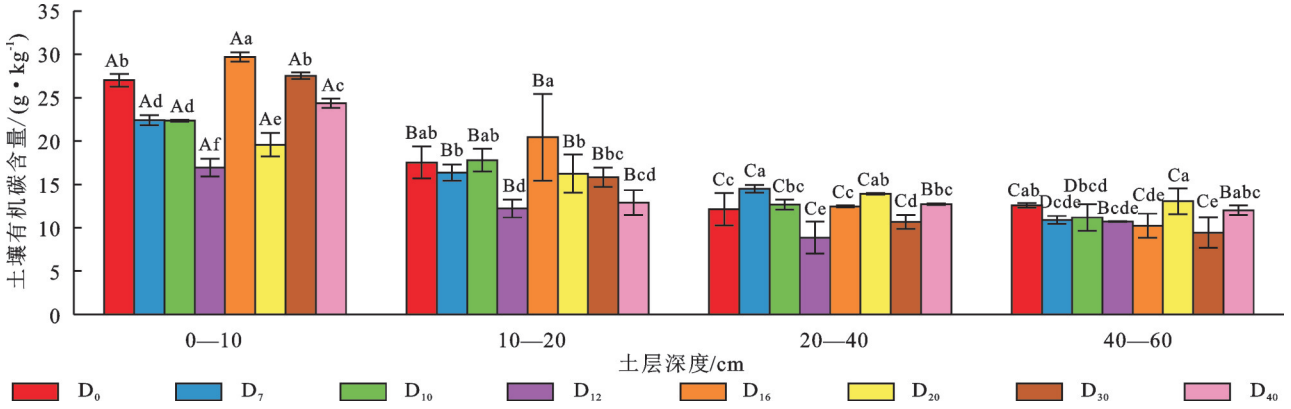
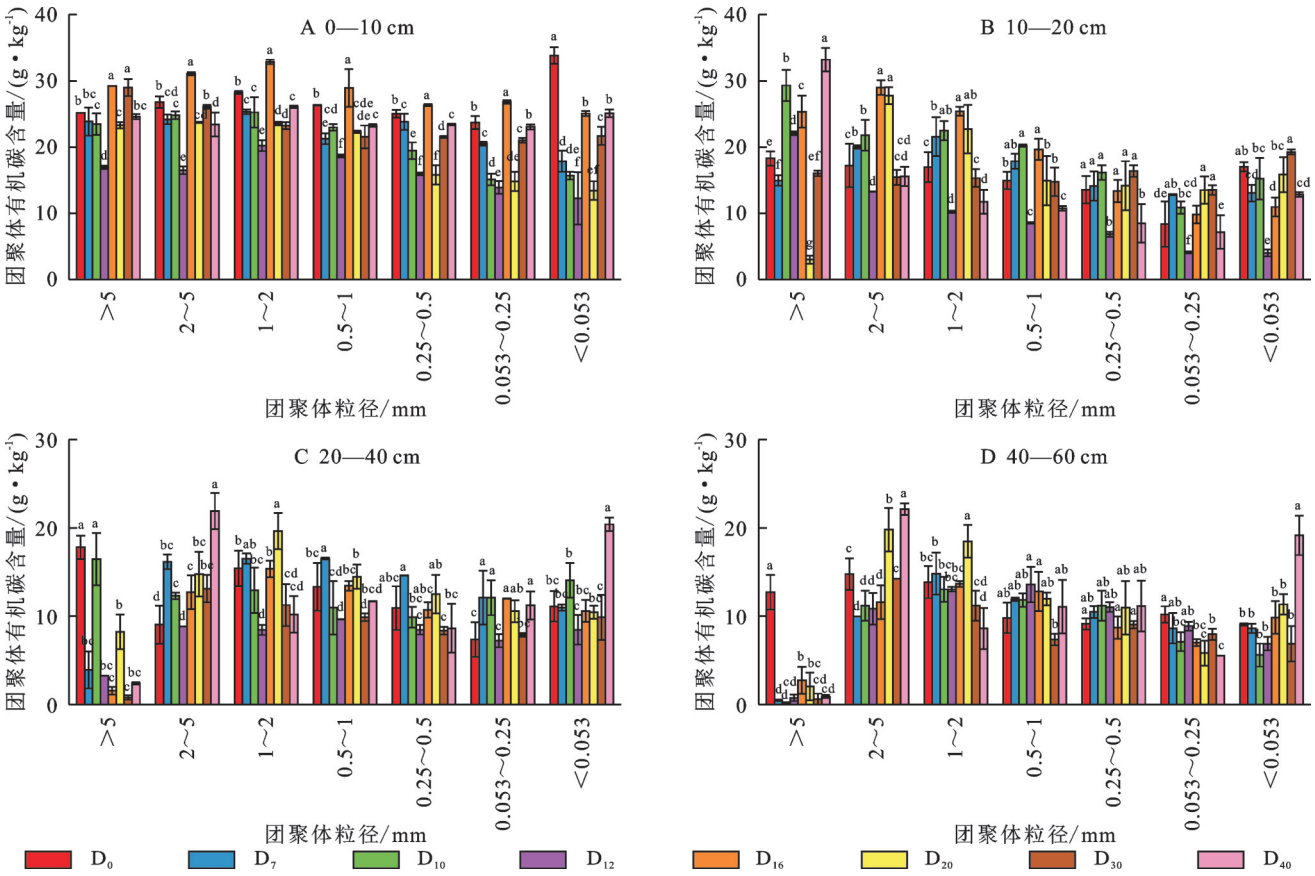


图3 不同种植年限下土壤SOC含量

Fig. 3 Soil organic carbon (SOC) content under different planting years

不同种植年限对各土层团聚体SOC含量的影响如图4所示。0—10 cm土层,与D_0样地相比,D_{16}样地显著提高了除<0.053 mm粒级外的各粒级团聚体SOC含量,增幅范围在1.28%~4.63%,D_{30}样地在>5 mm团聚体SOC含量比D_0样地多,增幅为3.82%(图4A);10—20 cm土层,与D_0样地相比,D_{10},D_{12},D_{16}和D_{40}样地提高了>5 mm团聚体SOC含量,增幅范围在3.78%~14.9%,各样地团聚体SOC含量差异随粒径的减少而缩小(图4B);20—40 cm土层,团聚体SOC含量随粒径的减小先增大后减小至稳定,各样地>5 mm粒级团聚体SOC含量均小于D_0样地,而2~5 mm粒级则反之,D_{40}样地<0.053 mm团聚体SOC含量显著高于D_0样地,增幅为9.28%(图4C);40—60 cm土层,与D_0样地相比,各样地>5 mm粒级团聚体SOC含量均小于D_0样地,D_{20}样地2~5,1~2 mm以及D_{40}样地2~5和<0.053 mm团聚体SOC含量显著高于D_0样地,增幅范围在4.62%~10.1%(图4D)。各粒级土壤团聚体SOC含量均随着土层深度的增加而减少,0—10 cm和10—20 cm土层各粒级团聚体SOC含量普遍高于20—40 cm和40—60 cm,这表明SOC在表层积累。



注:小写字母表示相同土层相同粒径不同样地间差异显著($p<0.05$),下同。

图 4　不同种植年限下不同粒级团聚体 SOC 含量

Fig. 4　SOC content of aggregates of different particle sizes under different planting years

2.3　团聚体有机碳富集系数及贡献率

从图 5 可以得知,不同粒级团聚体 SOC 富集系数存在较大差异,团聚体粒径减小和土层加深均呈现先升后降的趋势;与 D_0 样地相比,>2 mm 粒级团聚体 SOC 富集系数在 0—20 cm 土层随柑橘种植年限的延长逐年上升至稳定波动状态,0.25~2 mm 粒级团聚体 SOC 富集系数表现为早期上升后期下降的趋势,<0.25 mm 粒级团聚体 SOC 富集系数整体呈现微微上升的趋势,0—10 cm 土层所有样地>5 mm 团聚体 SOC 富集系数均高于 D_0 样地,而 20—40 cm 和 40—60 cm 土层则反之,2~5 mm 团聚体 SOC 富集系数在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层中随种植年限呈现上升趋势。整体而言,团聚体 SOC 在表层(0—20 cm)比深层(20—60 cm)更富集。

从图 6 可以得知,0—10 cm 土层土壤团聚体 SOC 贡献率随粒径减小呈先降低后稳定的趋势,>5 mm 团聚体 SOC 贡献率最高,随种植年限延长,>2 mm 粒级团聚体 SOC 贡献率先上升后趋于稳定状态;10—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤团聚体 SOC 贡献率均随粒径减小先升高后减小的趋势,0.5~1 mm 团聚体 SOC 贡献率最高。

2.4　土壤团聚体稳定性、有机碳与种植年限的相关性分析

为更清楚直观地了解该区域团聚体稳定性指标与土壤有机碳含量随种植年限变化的整体趋势,绘制团聚体稳定性指标和土壤有机碳含量与种植年限的相关性分析图(图 7)。结果显示,团聚体稳定性指标 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 以及土壤 SOC 含量均与种植年限呈正相关关系;旱地转变为种植柑橘初期,土壤团聚体稳定性和 SOC 含量均下降,但随着种植年限的延长,团聚体稳定性逐渐提升,土壤 SOC 含量逐渐增多。

由图 8 相关性分析可知,各粒级土壤团聚体 SOC 与土壤稳定性指标呈显著正相关(图 8A)。对于团聚体 SOC 贡献率而言(图 8B),大粒级团聚体(>5,2~5 mm)SOC 贡献率与 $R_{0.25}$,MWD,GMD 呈高度显著正相关($p<0.001$),小粒级团聚体(1~2,0.5~1 mm)SOC 贡献率与稳定性指标的相关性显著降低,其中 0.5~1 mm 粒级团聚体 SOC 贡献率与 MWD 和 GMD 呈极显著负相关($p<0.01$),微团聚体(0.25~0.5,0.053~0.25 和 <0.053 mm)SOC 贡献率与 $R_{0.25}$,MWD,GMD 呈高度显著负相关($p<0.001$)。对于团聚体 SOC 富集系数而言(图 8C),大粒级团聚体(>5 mm)SOC 富集系数与

$R_{0.25}$,MWD,GMD呈显著正相关($p<0.05$),2～5 mm粒级团聚体SOC富集系数与稳定性指标的相关性降低,甚至出现弱负相关,小粒级团聚体(1～2,0.5～1 mm)SOC富集系数与$R_{0.25}$,MWD,GMD呈显著负相关($p<0.05$),微团聚体(0.25～0.5,0.053～0.25和<0.053 mm)SOC富集系数与$R_{0.25}$,MWD,GMD无显著相关性。

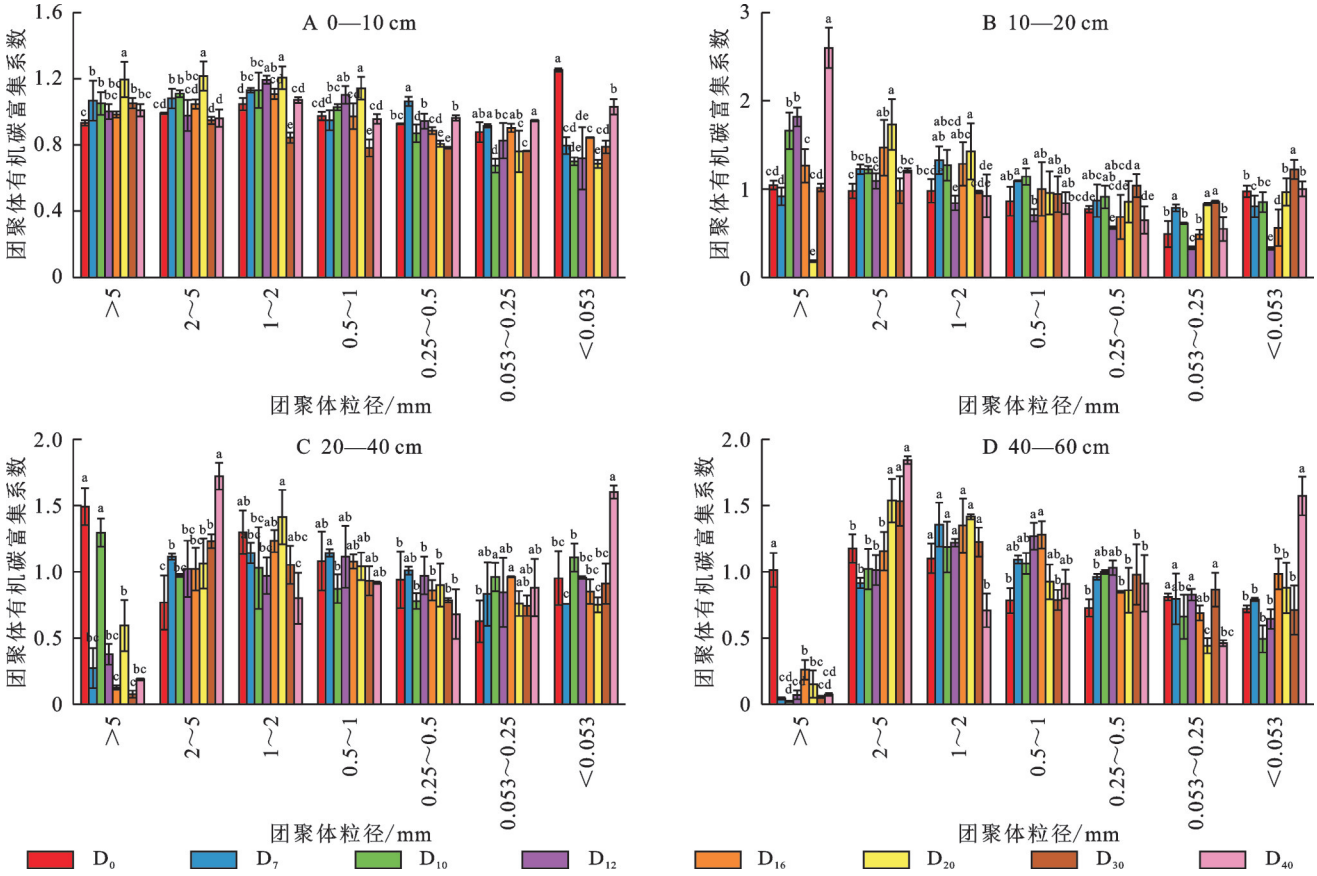


图5 不同种植年限下不同粒级团聚体SOC富集系数

Fig. 5 SOC enrichment coefficients of aggregates of different grain sizes under different planting years

3 讨论

3.1 种植年限对团聚体组成和稳定性的影响

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元[7],其形成与稳定是物理、化学和生物过程共同作用的复杂结果,这一特性使其对环境变化及扰动(如土地利用变化和耕作)的响应较为敏感,关乎土壤肥力、抗侵蚀能力等关键生态功能[18]。本研究发现,旱地转化为柑橘种植整体呈现出>0.25 mm的大团聚体比例随种植年限增加先升后稳定的趋势,<0.25 mm的微团聚体则反之,这与之前研究结果表现不一致[19]。柑橘种植的初期,>0.25 mm的大团聚体含量显著下降,可能是由于开垦等物理扰动破坏了土壤大团聚体[9];历经多年种植后,柑橘树根系的充分发育引起物理缠绕作用加强,同时根系分泌物持续输入以及随之增强的土壤生物活性使得柑橘园生态系统逐渐趋于稳定和成熟,土壤有机胶结物质含量增加[20],进而促进>0.25 mm大团聚体比例显著回升。但柑橘种植的第20年时表层(0—20 cm)>0.25 mm大团聚体比例出现下降情况,经实地走访核查,该样地未实施与其他年限不同的特定农事操作。该现象主要源于柑橘树生长的个体差异引发样地微环境局部变异,但该变异未改变种植年限影响下团聚体的整体变化规律;此外,不同年限柑橘土壤中20 a柑橘土壤的木质素酚氧化程度较高[21],其氧化产物削弱矿物颗粒与有机分子的连接,抑制微生物细胞外聚合物(EPS)分泌,导致大团聚体结构松散[20]。当种植年限超过20 a,大团聚体比例不再持续增加,而是在小范围内波动并趋于稳定,其主要原因可分为两个方面,一方面是果园生态系统逐渐成熟,根据系统趋于内在稳定的自然规律,其团聚体的形成与破碎速率也达到动态平衡;另一方面化肥的施用会引起土壤pH值的下降,使土壤微生物多样性降低,生物作用对团聚体的积极构建效果减弱,最终导致大团聚体比例无法进一步增长[22]。对比不同土层团聚体组成,分析表明>2 mm大团聚体的比例随土层加深呈显著递减趋势,而<0.25 mm的微团聚体则在深层土壤中富集,这与之前研究结果一致[23]。原因在于表层土壤(0—20 cm)是根系分泌物

和外源肥料的主要作用区,且本研究结果显示SOC在表层富集,这些为形成大团聚体提供了丰富的有机胶结物质和活跃的微生物[3],而深层土壤(20—60 cm)受上述因素影响较弱,且土壤容重上升,总孔隙度和含水率下降,其结构更接近于母质基础[24],故以稳定性高但胶结作用弱的微团聚体为主。

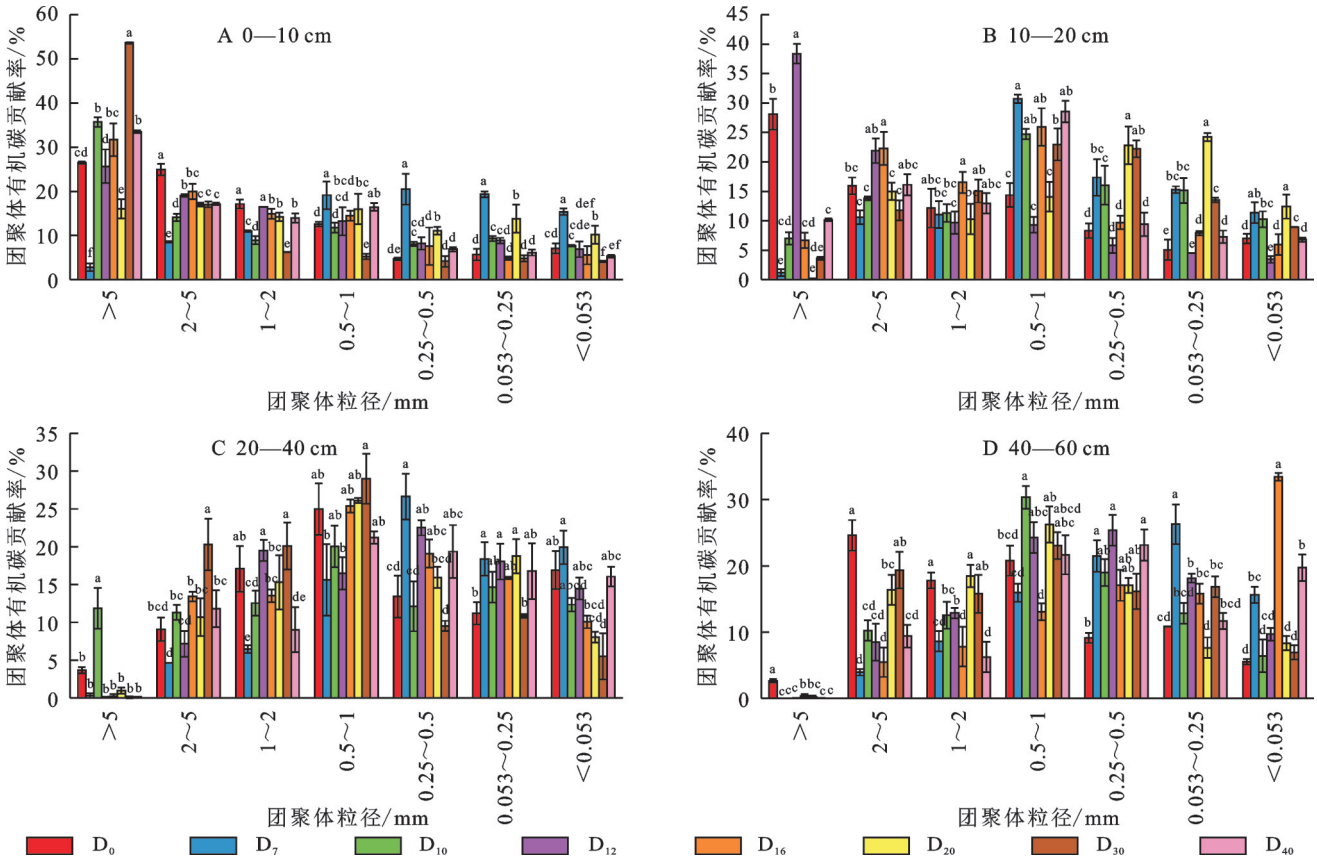
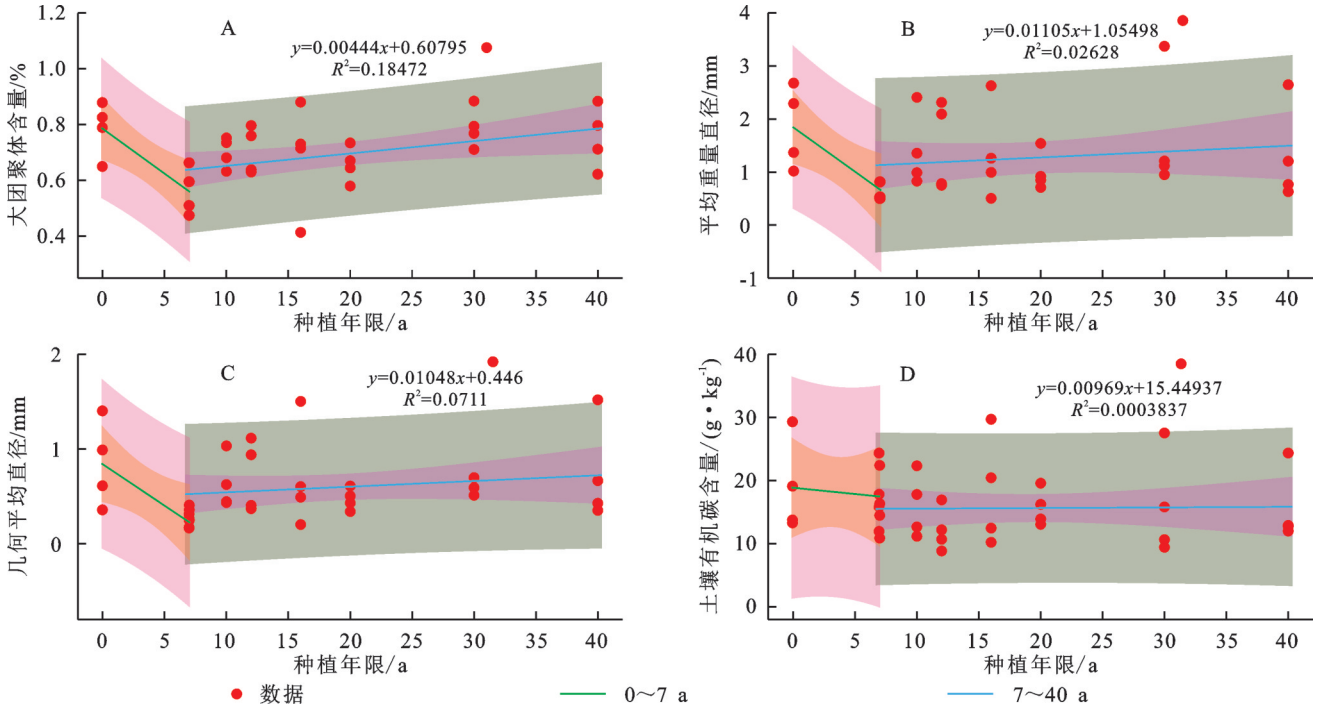


图 6　不同种植年限下不同粒级团聚体SOC贡献率

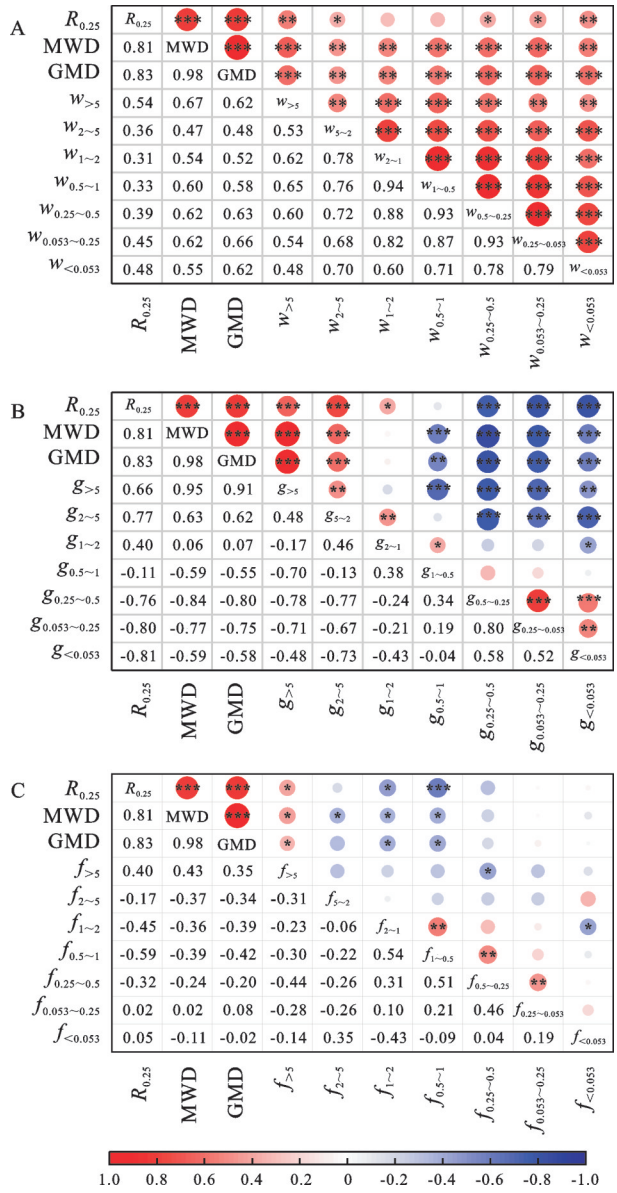
Fig. 6　SOC contribution rate of aggregates of different grain sizes under different planting years



注:图中0~7 a的线段表示旱地耕种转为柑橘种植初期土壤的变化;7~40 a的线段表示旱地耕种转为种植柑橘后种植年限对土壤的影响。

图 7　团聚体稳定性指标和土壤有机碳含量与种植年限的关系

Fig. 7　Relationship between aggregate stability indicators, SOC content, and planting years



注：团聚体稳定性指标采用$R_{0.25}$，MWD和GMD；图A，B，C中的w，g和f分别表示团聚体各粒径有机碳含量、贡献率和富集系数；*表示显著性相关（$p<0.05$），**表示极显著相关（$p<0.01$），***表示高度显著相关（$p<0.001$）。

图8 团聚体稳定性指标和团聚体有机碳含量、贡献率以及富集系数的关系

Fig. 8 Relationship between aggregate stability indicators and organic carbon content, contribution rate, and enrichment coefficient of aggregates

研究显示，土壤团聚体稳定性与$R_{0.25}$，MWD和GMD值成正比[25]。本研究选用这三项指标对土壤团聚体稳定性进行综合评价，研究表明，长期的柑橘种植有利于提高土壤团聚体稳定性（图7）。相关性分析显示（图8），各粒级团聚体中的SOC含量均与稳定性指标呈正相关，证实了SOC作为关键胶结物质为土壤提供了稳定的有机碳源，从而直接促进了大团聚体的胶结和稳定。更重要的是，促进了SOC向大团聚体内优先富集，促使土壤物质由不稳定的微团聚体向稳定的大团聚体进行转化[18]。本研究中，土壤团聚体稳定性随土层深度增加而递减，这主要归因于有机质自上而下分布，且表层土壤相较于深层土壤更频繁经历干湿交替，有助于促进微团聚体向大团聚体的转化[7]。未来应重视深层土壤SOC的积累，有利于提高深层土壤团聚体稳定性。

3.2 种植年限对有机碳的影响

土壤SOC不仅是土壤肥力的物质基础，还是衡量土壤健康与生态系统固碳能力的关键指标[8]，更是团聚体形成与稳定的关键胶结物质[26]。本研究结果表明：长期的柑橘种植，土壤SOC表现出正向的积累效应，与王义祥等[25]的研究结果存在差异，这主要与研究区立地条件、果园管理模式及柑橘品种特性相关。从旱地转化为柑橘种植的初期，土壤SOC含量下降，这一现象与初期团聚体稳定性下降相吻合，其原因可能在于土地利用方式的改变打破了原有土壤碳库输入与输出的平衡，导致SOC的矿化分解速率在短期内远超新的碳输入速率[3]。但随着种植年限的增加，土壤SOC储量呈上升趋势。一方面，随着果树成熟，植被覆盖度得到提高，为土壤提供了更丰富的有机质来源，且抑制水土流失减少了SOC的物理性损失，从而促进了土壤有机碳的积累[27]；另一方面，团聚体稳定性的提高为这些新输入的SOC提供了有效的物理保护，极大地减缓了其矿化分解速率[28]。此外，本研究还进一步聚焦SOC的垂直分布特征，发现同一种植年限下，土壤SOC储量随土层加深而显著递减，说明SOC具有表层积累效应。其原因可能在于地表凋落物的分解和根系分泌物主要集中在土壤表层，且可溶性有机碳（DOC）在水分驱动下向下迁移，使得表层土壤拥有持续且丰富的有机碳源[29]，同时表层土壤中发育良好的团聚体结构也为有机碳提供了有效的物理保护[28]。

土壤团聚体作为SOC固定的基本单元[18]，其内部碳的分布特征能更深刻地揭示SOC的固存机理。因此，本研究进一步分析了SOC在不同粒径团聚体中的分配规律，数据显示：团聚体SOC含量随粒径的减小呈先升高后降低的趋势，优先向>0.25 mm的大团聚体富集，且这一过程随年限延长而增强，同时团聚体SOC在表层比深层更富集。其主要原因可能在于柑橘种植输入的新鲜有机质作为高效的生物胶结剂被优先用于构建表层大团聚体[30]，这与前文所得关于表层土壤大团聚体含量高于深层土壤的结论相对应，这些大团聚体具有较强的稳定性（图8表明大粒径团聚体SOC贡献率和富集系数与团聚体稳定性呈正相关）和良好的孔隙条件可以支撑微生物繁殖，强化碳的固持，导致团聚体SOC优先向大团聚体和

表层富集[18]。以上结果表明，稳定的大团聚体是连接柑橘碳输入与土壤长期碳固存的关键功能载体。

3.3　研究局限性

本研究采用空间替代时间法探究柑橘园种植年限对土壤团聚体及有机碳的影响，该方法在生态学长期过程研究中已被广泛应用[14,21]。本研究在严格筛选样地（确保其具有相同成土母质、地形、历史利用方式及集约化管理模式等）的基础上应用此法，构建了 0～40 a 的种植年限序列，所得结果能够有效揭示团聚体与有机碳随种植年限的演变规律，示意图如图 9 所示。然而，该方法作为一种“以空间换时间”的推论手段，其固有局限在于难以完全排除样地间微弱的初始异质性对时间序列推断的潜在影响。未来可建立长期定位监测样地，结合微观监测技术，进一步完善鄂西地区柑橘园土壤团聚体与有机碳的固存机理。

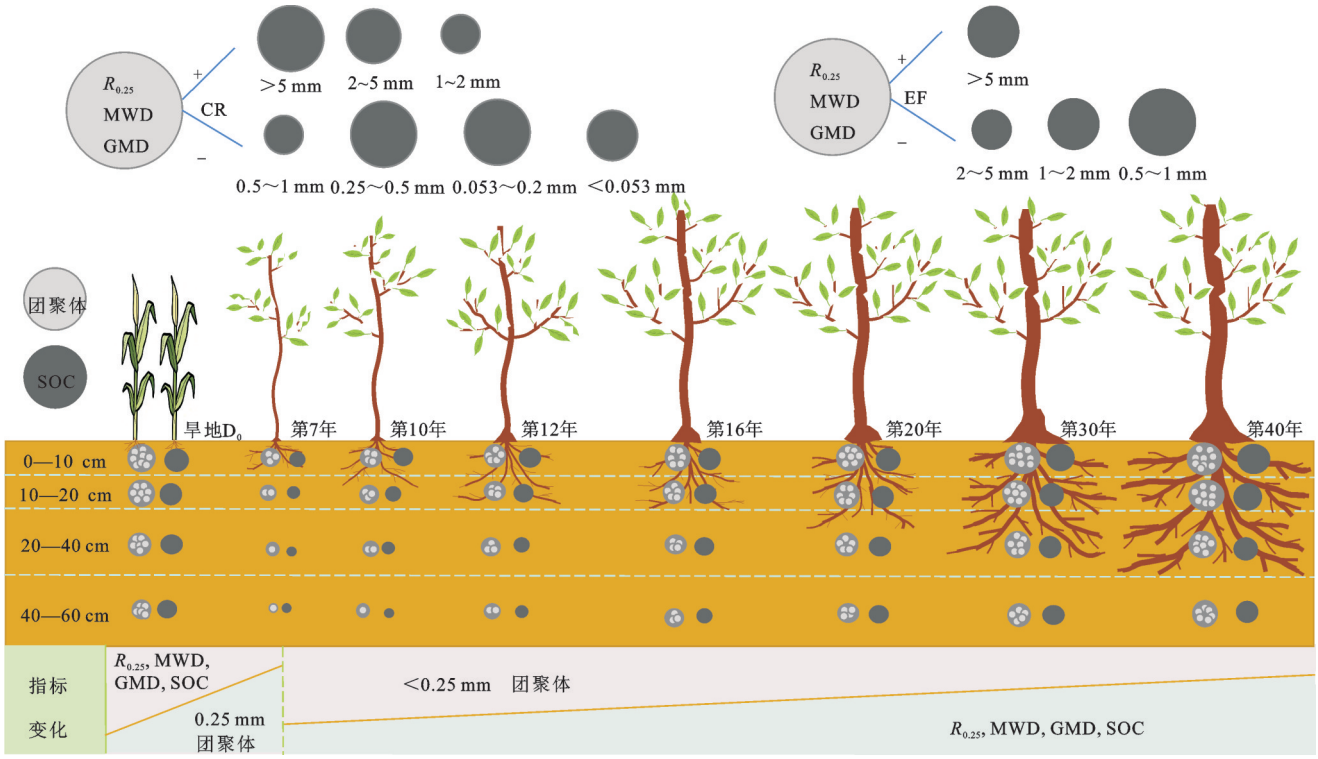


图 9　不同种植年限柑橘园土壤团聚体与有机碳变化示意图

Fig. 9　Schematic diagram of soil aggregate and organic carbon changes in citrus orchards with different planting years

4　结　论

（1）旱地改种柑橘后，不同种植年限的土壤团聚体组均以＞0.25 mm 粒级为主，SOC 主要富集在 2～5，1～2 mm 粒级中；随着树龄的增长，柑橘园大团聚体含量及其 SOC 所占比例越大，表明随着种植年限延长，土壤团聚过程增强，微团聚体向大团聚体转化。

（2）对比不同土层发现土壤团聚体稳定性（$R_{0.25}$，MWD，GMD）与 SOC 含量均随土层加深呈显著递减趋势。

（3）相关性分析表明，土壤大团聚体（＞5 mm）SOC 的富集和贡献率均与土壤团聚体稳定性（$R_{0.25}$，MWD，GMD）呈显著正相关，说明土壤结构的稳定与 SOC 固存通过大团聚体形成了协同促进的正反馈循环。

（4）建议今后柑橘管理，在提升表层土壤碳汇的同时重视土壤结构稳定性的提升，并采取一定措施以提升深层土壤固碳能力。

参考文献（References）：

[1]　龙花楼，戈大专，王介勇．土地利用转型与乡村转型发展耦合研究进展及展望[J]．地理学报，2019，74(12)：2547-2559.
Long H L, Ge D Z, Wang J Y. Progress and prospects of the coupling research on land use transitions and rural transformation development[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2547-2559.

[2]　范焰焰，盛储望，谢运生．赣南丘陵区脐橙种植对土壤团聚体稳定性和有机碳的影响[J]．节水灌溉，2025(5)：9-14，20.
Fan Y Y, Sheng C W, Xie Y S. Multiple effects of *Citrus sinensis* (L.) Osbeck growth on the soil aggregates stability and organic carbon of southern hilly region of Jiangxi[J]. Water Saving Irrigation, 2025(5): 9-14, 20.

[3]　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.
Luo X H, Wang Z F, Lu C, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil

aggregates[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3816-3824.

[4] 鲁泽让,陈佳钰,李智贤,等.冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响[J].环境科学,2024,45(4):2363-2372.
Lu Z R, Chen J Y, Li Z X, et al. Effects of winter green manure mulching on soil aggregates, organic carbon, and AMF diversity[J]. Environmental Science, 2024,45(4): 2363-2372.

[5] 熊燕飞,张安录,刘蒙罢,等.柑橘园扩张对生态系统服务和景观格局的影响:以江西省信丰县为例[J].生态学报,2022,42(19):7845-7857.
Xiong Y F, Zhang A L, Liu M B, et al. Effects of citrus orchard expansion on ecosystem services and landscape pattern: a case study of Xinfeng County Jiangxi Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7845-7857.

[6] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014,69(1):3-14.
Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(1):3-14.

[7] 李娟,韩霁昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):248-253,259.
Li J, Han J C, Chen C, et al. Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(1):248-253,259.

[8] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality: a critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,120:105-125.

[9] 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.
Lin Z, Huang Z G, Deng Y S, 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.

[10] 魏彬萌,王益权,李忠徽.种植苹果树对渭北果园土壤胶结物质分布的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1692-1700.
Wei B M, Wang Y Q, Li Z H. Effects of planting apple trees on distribution of soil cementing materials in Weibei apple orchards[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(11):1692-1700.

[11] 朱士江,李虎,徐文,等.三峡库区土壤含水量对柑橘园果实品质的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(6):201-207.
Zhu S J, Li H, Xu W, et al. Effects of soil moisture content on fruit quality in citrus orchards within Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023,25(6):201-207.

[12] 胡漫,曾全超,周全,等.集约化种植柑橘土壤细菌群落多样性与生态系统多功能性的耦合机制研究[J].土壤学报,2025,62(4):1197-1209.
Hu M, Zeng Q C, Zhou Q, et al. Study on the coupling mechanism between soil bacterial community diversity and ecosystem multifunctionality in intensive citrus cultivation systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4):1197-1209.

[13] Allen M F, Swenson W, Querejeta J I, et al. Ecology of mycorrhizae: a conceptual framework for complex interactions among plants and fungi[J]. Annual Review of Phytopathology, 2003,41(1):271-303.

[14] 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.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
Bao S D. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[16] Parent E L, Almeida D X C, Hernandes A, et al. Compositional analysis for an unbiased measure of soil aggregation[J]. Geoderma, 2012,179/180:123-131.

[17] 薛欣欣,王文斌,茶正早,等.不同绿肥覆盖对幼龄橡胶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].环境科学,2025,46(11):7013-7021.
Xue X X, Wang W B, Cha Z Z, et al. Effects of different green manure covering on soil organic carbon and size distribution of aggregates in a young rubber plantation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 46(11):7013-7021.

[18] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil & Tillage Research, 2004,79(1):7-31.

[19] 董栌遥.秭归山地橘园土壤的团聚体和可蚀性特征研究[D].武汉:华中农业大学,2023.
Dong L Y. Soil aggregate and erodibility of Zigui Mountain citrus orchard[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

[20] 张铭,蔡鹏,吴一超,等.细菌胞外聚合物:基于土壤生态功能的视角[J].土壤学报,2022,59(2):308-323.
Zhang M, Cao P, Wu Y C, et al. Bacterial extracellular polymeric substances: from the perspective of soil ecological functions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59

(2):308-323.

[21] 陈锐峰.三峡库区不同柑橘种植年限土壤有机碳变化特征及微生物驱动机制研究[D].重庆:重庆交通大学,2025.
Chen R F. Study on the characteristics of soil organic carbon changes and microbial driving mechanisms in citrus plantations with different planting years in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.

[22] Guo H J, Liu J X, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968):1008-1010.

[23] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.桂西北喀斯特土壤对生态系统退化的响应[J].应用生态学报,2010,21(5):1308-1314.
Wei Y W, Su Y R, Chen X B, et al. Responses of soil properties to ecosystem degradation in karst region of northwest Guangxi, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(5):1308-1314.

[24] 冯浩亮,韩晓增,陆欣春,等.有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展[J].土壤与作物,2023,12(4):393-400.
Feng H L, Han X Z, Lu X C, et al. Research progress on the formation and stability of soil aggregates by organic fertilization[J]. Soils and Crops, 2023,12(4):393-400.

[25] 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.
Wang Y X, Ye J, Huang Y B, et al. Effect of cultivation history of citrus orchard on organic carbon in soil aggregates therein [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015,31(5):724-729.

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

[27] 郑博福,徐子伟,万子健,等.柑橘果园扩张背景下流域土壤侵蚀及固碳量时空格局与驱动因素[J].农业工程学报,2025,41(18):111-121.
Zheng B F, Xu Z W, Wan Z J, et al. Spatiotemporal pattern and driving factors of soil erosion, conservation and carbon sequestration capacity in the basin against citrus orchard expansion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(18): 111-121.

[28] 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.
Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(4):618-623.

[29] 秦文宽,李晓杰,王旭东,等.土壤溶解性有机碳对气候变暖的响应研究进展[J].北京大学学报(自然科学版),2024,60(4):758-766.
Qin W K, Li X J, Wang X D, et al. Responses of soil dissolved organic carbon to climate warming: a review [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024,60(4):758-766.

[30] Cotrufo F M, Soong L J, Horton J A, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss[J]. Nature Geoscience, 2015,8(10):776-779.

(上接第 137 页)

[25] Chen H N, Xiang Y, Yao Z X, et al. Stability of C:N:P stoichiometry in the plant-soil continuum along age classes in natural *Pinus tabuliformis* carr. Forests of the eastern Loess Plateau, China [J]. Forests, 2023, 14(1):44.

[26] 宋超,陈云明,曹扬,等.黄土丘陵区油松人工林土壤固碳特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2015,13(3):76-82.
Song C, Chen Y M, Cao Y, et al. Characteristics of soil carbon sequestration in *Pinus tabulaeformis* plantations and influencing factors in the Loess Hilly Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(3):76-82.

[27] Li J Z, Qiang F F, Ai N, et al. Soil quality evaluation and analysis of driving factors of *Pinus tabuliformis* in loess hilly areas[J]. Forests, 2024,15(9):1603.

[28] Li J Z, Qiang F F, Ai N, et al. Soil evolution and driving factors in *Pinus tabuliformis* forests of the Loess Hilly Region [J]. Journal of Environmental Management, 2025,395:127883.