

南丰蜜橘果园生草栽培对土壤团聚体和有机碳特征及果实品质的影响

付学琴^{1,*}, 杨星鹏¹, 陈登云², 甘燕云³, 黄文新⁴

(¹江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022; ²江西省高安市农业农村局, 江西高安 330800; ³新余市农业农村局, 江西新余 338000; ⁴江西省农业农村厅, 南昌 330046)

摘要:以‘南丰蜜橘’果园土壤为对象, 分析行间播种白三叶草 (*Trifolium repens*)、黑麦草 (*Lolium multiflorum*) 和清耕条件下土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体组成、团聚体稳定性、团聚体有机碳含量及其贡献率的差异。结果表明: 生草后土壤机械稳定性团聚体以 > 5 mm 粒级团聚体居多 (占比 28.52% ~ 35.14%), 而清耕对照处理以 < 0.25 mm 粒级团聚体居多 (35.51% ~ 36.86%); 水稳性团聚体各处理均以 < 0.25 mm 粒级团聚体为多 (55.71% ~ 80.47%); 大团聚体比重 $R_{0.25}$ 总体为黑麦草 > 白三叶草 > 对照。在 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土层中, 白三叶草处理机械稳定性团聚体和水稳性团聚体平均质量直径 (MWD) 较对照分别提高了 126.03%、106.8% 和 57.69%、31.25%, 团聚体破坏率 (PAD) 分别降低了 13.29% 和 12.41%; 黑麦草处理机械稳定性团聚体和水稳性团聚体平均质量直径 (MWD) 分别提高了 140.41%、125.17% 和 82.69%、64.58%, PAD 分别降低了 12.85% 和 16.61%, 表明生草处理有利于大团聚体的形成, 改善土壤结构的稳定性, 且禾本科类牧草黑麦草处理明显优于豆科类牧草白三叶草处理。生草处理较大幅度提高了 0 ~ 10 cm 表层土层水稳性团聚体中总有机碳和各粒级团聚体有机碳含量, 且白三叶草处理明显优于黑麦草处理。相关性分析表明, 团聚体 MWD 和 GMD 与 1 ~ 5 mm 粒级团聚体有机碳含量之间均呈现显著正相关, PAD 与各粒级团聚体有机碳含量之间均呈现出负相关。生草处理能明显提高‘南丰蜜橘’果实可溶性糖、可溶性固形物和维生素 C 含量, 降低可滴定酸含量, 改善果实鲜食品质, 且白三叶草处理明显优于黑麦草处理。

关键词: 柑橘; 果园; 生草栽培; 土壤; 团聚体; 有机碳; 果实品质

中图分类号: S 666

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2020) 10-1905-12

Effects of Sod Culture on Soil Aggregates, Organic Carbon Characteristic and Fruit Quality of Nanfeng Tangerine Orchard

FU Xueqin^{1,*}, YANG Xingpeng¹, CHEN Dengyun², GAN Yanyun³, and HUANG Wenxin⁴

(¹College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; ²Gao'an Agricultural Bureau, Gao'an, Jiangxi 330800, China; ³Xinyu Agriculture Bureau, Xinyu, Jiangxi 330046, China; ⁴Jiangxi Agriculture Department, Nanchang 330046, China)

Abstract: The mechanical stable aggregates, water-stable aggregates, aggregate stability and the organic carbon content of aggregates in Nanfeng tangerine orchards intercropping *Trifolium repens* and

收稿日期: 2020 - 04 - 16; **修回日期:** 2020 - 08 - 07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760547); 江西省科技重点研发项目 (20181BBF6003); 江西省教育厅科技研究项目 (2018)

* E-mail: 1203826333@qq.com

Lolium multtiflorum were investigated. The results showed that the mechanical stable aggregates ($> 5\text{ mm}$) occupied 28.52% – 35.14% in sod culture Nanfeng tangerine orchards, while the aggregates ($< 0.25\text{ mm}$) were 35.51% – 36.86% in clear tillage tangerine orchards. The water-stable aggregates ($< 0.25\text{ mm}$) were the dominant and accounted for 55.71% – 80.47% in all treatments. The overall change trend of aggregate $R_{0.25}$ was *Lolium multtiflorum* treatment $>$ *Trifolium repens* treatment $>$ control. At the 0 – 10 cm and 10 – 20 cm soil layers in tangerine-white clover intercropping system, the mean weight diameter (MWD) of mechanical stable aggregates and water-stable aggregates increased by 126.03%, 106.8% and 57.69%, 31.25% and the polyagglomerate destruction rate (PAD) reduced by 13.29% and 12.41% compared with the control respectively. Simultaneously, MWD of mechanical stable aggregates and water-stable aggregates increased by 140.41%, 125.17% and 82.69%, 64.58% and PAD decreased by 12.85% and 16.61% in tangerine-*Lolium multtiflorum* intercropping system compared with the control, respectively. It showed that sod culture contributed to the formation of large aggregates and improved the soil structure stability and quality. And the improvement effect on the soil by intercropping *Lolium multtiflorum* was better than that by intercropping *Trifolium repens*. The sod culture greatly increased the total organic carbon content of water-stable aggregates and organic carbon content in different aggregate size classes at the 0 – 10 cm top soil, and the influence of *Trifolium repens* cultivation was superior than that of *Lolium multtiflorum* cultivation. Correlation analysis showed that the MWD and GMD was positively related to the organic carbon content of particle size aggregate (1 – 5 mm) and PAD was on the contrary. Naturally grown grass could increase the soluble sugar, soluble solids and vitamin C content, reduce the titratable acid content and improve the fresh food quality of Nanfeng mandarin fruit. And *Trifolium repens* had better improvement effect on fruit quality than *Lolium multtiflorum*.

Keywords: citrus; orchard; sod culture; soil; aggregates; organic carbon; fruit quality

‘南丰蜜橘’是中国柑橘类中的著名品种，近年来在市场上非常畅销，多地推广种植，2018 年种植面积达 7.8 万 hm^2 ，产量达 135 万 t。然而，由于长期采用传统清耕制管理模式，导致果园出现了土壤质量下降、肥力降低、病虫害加重、土壤侵蚀等一系列生态环境问题，对‘南丰蜜橘’产量、品质和种植效益带来严重影响（丁明华和涂艺声，2012；付学琴 等，2015）。果园生草栽培可以明显改善土壤理化性状，提高有机质含量，维持养分平衡，改善果园生态环境，有效解决长期清耕制带来的负面危害（李华 等，2004；白龙 等，2015）。在果园生草复合系统中，果树与牧草通过对光、热、水、养分等资源的吸收利用而产生种间互作效应，尤其是对土壤资源利用及土壤的反馈作用是决定果园生草复合系统能否实现高效持续发展的关键，也是牧草与果树相互作用的主要驱动力与驱动机制。

土壤团聚体是一种由土壤颗粒胶结形成的粒状或小团块状的结构体，其数量和质量不仅决定土壤肥力的高低，还与土壤的抗蚀能力、固碳容量和环境质量等直接相关（徐香茹和汪景宽，2017；Zhu et al.，2017；徐国鑫 等，2018）。通常认为： $> 0.25\text{ mm}$ 粒级土壤团粒结构体是土壤中最好的结构体，其数量与土壤状况正相关，即土壤团聚体粒径越大，土壤稳定性越好（Six et al.，2000；魏亚伟 等，2011；李侠 等，2014）。土壤有机碳是土壤环境质量和功能的核心，其含量与土壤物理性状、化学性状、生物性状变化密切相关，对土壤团聚体的数量和大小分布具有重要影响，且与水稳性团聚体关系密切，而团聚体形成是土壤有机碳蓄积的重要机制，特别是土壤团聚体对有机碳的

“隔离”和“吸附”物理保护(潘根兴等, 2007; Chivenge et al., 2011; Gao et al., 2015; Ou et al., 2016)。目前, 国内外已对生草条件下果园土壤团聚体及有机质碳的变化动态开展了一系列研究, 但结果不尽一致(王英俊等, 2013; 王耀锋等, 2014), 仍需要深入探讨。本试验中以传统清耕方式为对照, 探讨生草栽培对‘南丰蜜橘’果园土壤团聚体及团聚体有机碳的影响, 旨在探明生草后土壤团聚体及有机碳变化特征, 改善土壤质量状况, 以期为解决‘南丰蜜橘’生产中存在的问题, 构建合理的果园土壤管理模式提供科学依据, 进而推进‘南丰蜜橘’产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2010—2018 年在江西南丰县蜜桔产业局研究基地进行。该基地位于东经 116°26′, 北纬 26°35′, 属亚热带季风气候, 年平均气温 18.3 °C, 降水量 1 700 mm, 日照数 1 928.2 h, 无霜期 269 d 左右。橘园面积约 20 hm², 为低丘缓坡地, 土壤属黄红壤, 有机质含量 9.24 g · kg⁻¹, 全氮含量 4.15 g · kg⁻¹, 全磷含量 0.21 g · kg⁻¹, 全钾含量 4.06 g · kg⁻¹, 碱解氮含量 57.12 mg · kg⁻¹, 速效磷含量 40.23 mg · kg⁻¹, 速效钾含量 18.22 mg · kg⁻¹, pH 4.71。南丰蜜橘树龄(嫁接后)15 年, 砧木为枳。

1.2 试验设计

设计种植白三叶草、黑麦草和清耕对照 3 个处理。采取单因素随机区组设计, 每个处理小区面积为 1.0 hm², 每个处理重复 3 次。生草栽培于 2010 年春季进行, 行间连续 9 年播种, 播种量平均为 30 kg · hm², 每年刈草 2 次(5 月和 11 月中下旬), 就地覆盖; 清耕处理定期进行中耕除草。各处理其他措施基本一致, 常规管理。

1.3 样品采集与测定

2018 年 10 月中旬, 在各处理小区内“S”形布设 5 个采样点。每个点选取一个 0.8 m × 0.8 m 样方, 用修枝剪清除地上生物量之后, 挖取长约 60 cm, 宽约 50 cm, 深约 80 cm 的土壤剖面, 采集 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层原状土样, 置于铝质饭盒中, 以保持原状土壤结构。在室内将采集的原状土样摊开, 当土壤含水量达塑性极限时, 沿土壤自然裂隙轻轻掰成 10 mm 左右的小土团, 混合均匀后采用四分法采集各层次的混合样, 剔除根系、石头等杂物, 在阴凉处风干备用。待土壤样品完全风干后, 分别采用萨维诺夫干筛法和湿筛法测定 > 5、3~5、2~3、1~2、0.5~1、0.25~0.5 和 < 0.25 mm 各粒级土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量。采用重铬酸钾外加热法测定有机碳含量(鲁如坤, 2000)。

2018 年 11 月中旬, 在各处理小区随机选取 5 株长势一致、挂果正常的植株, 从东、南、西、北、中部采摘 5 个果实进行品质测定。采用 GY-1 型果实硬度计测定果实硬度, 采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量, 采用 NaOH 中和滴定法测定可滴定酸含量, 采用 TR-100 型数字折光仪测定果实可溶性固形物含量, 采用 2, 6-二氯酚酚滴定法测定维生素 C 含量(李合生, 2000)。

1.4 土壤团聚体指标计算方法与数据处理

各级团聚体的质量百分含量(%) = 该级团聚体质量/土壤样品总质量 × 100。

大团聚体比重($R_{0.25}$)的计算公式为: $R_{0.25} = M_{r>0.25}/M_T$, 式中 M_r 为各粒级团聚体质量(g), M_T 为团聚体总质量(g)。

团聚体破坏率 (percentage of aggregate destruction, PAD) 的计算公式为: $PAD (\%) = (W - W') / W \times 100$, 式中 W 、 W' 分别为 > 0.25 mm 的干筛、湿筛团聚体含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

土壤团聚体分形维数 (fractal dimension, D) 的计算公式为: $(3 - D) \lg(d_i/d_{\max}) = \lg[W_{(\delta < d_i)}/W_o]$, 式中 d_i/d_{\max} 为土粒直径与最大粒级土粒直径比。 $W_{(\delta < d_i)}$ 为土粒直径小于 d_i 积累质量; W_o 为全部各粒级土粒的质量之和, 利用此模型分别以 $\lg(d_i/d_{\max})$ 、 $\lg[W_{(\delta < d_i)}/W_o]$ 为横纵坐标, 结合回归法计算出分形维数。

平均质量直径 (mean weight diameter, MWD) 的计算公式为: $MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i / \sum_{i=1}^n W_i$; 几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 的计算公式为: $GMD = \sum_{i=1}^n (\ln X_i) W_i / \sum_{i=1}^n W_i$ 。式中 n 为粒径分组的组数; X_i 为第 i 粒径组分的平均直径 (mm), W_i 为第 i 粒径团聚体的质量分数。

团聚体对土壤有机碳的贡献率 (F) 的计算公式为: $F = ASOC_i \times P_i / SOC$, 式中 $ASOC_i$ 为第 i 粒级团聚体有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); P_i 为第 i 粒级团聚体占总团聚体比率 (%), SOC 为各层土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

采用 V7.55 版 DPS 和 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理、方差分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同生草类型对土壤团聚体大小分布特征的影响

2.1.1 机械稳定性团聚体组成

通过干筛法获得不同生草类型下土壤机械稳定性团聚体组成 (表 1)。

表 1 不同生草类型下土壤机械稳定性团聚体组成
Table 1 Composition of soil mechanical stability aggregates under different grass types %

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction			
		> 5 mm	$3 \sim 5$ mm	$2 \sim 3$ mm	$1 \sim 2$ mm
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	10.72 ± 1.23 c	9.69 ± 0.21 c	5.45 ± 0.18 b	1.81 ± 0.09 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	31.39 ± 1.91 b	22.74 ± 1.9 b	8.38 ± 0.33 a	4.21 ± 0.07 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	35.14 ± 1.51 a	25.01 ± 1.81 a	7.95 ± 0.67 ab	6.99 ± 0.03 a
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	10.36 ± 1.29 c	10.82 ± 0.47 b	5.63 ± 0.15 c	2.23 ± 0.06 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	30.11 ± 1.08 b	21.56 ± 2.10 ab	7.64 ± 0.91 b	3.37 ± 0.08 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	33.52 ± 1.23 a	22.59 ± 1.07 a	8.96 ± 0.20 a	4.42 ± 0.06 a
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	9.99 ± 1.17 b	10.71 ± 0.58 c	5.66 ± 0.23 b	1.96 ± 0.05 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	28.52 ± 1.82 ab	20.08 ± 1.15 ab	6.86 ± 0.27 a	2.20 ± 0.04 ab
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	30.07 ± 2.63 a	21.37 ± 1.22 a	6.91 ± 0.14 a	2.32 ± 0.02 a
土层/cm Soil layer	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction			$R_{0.25}$
		$0.5 \sim 1$ mm	$0.25 \sim 0.5$ mm	< 0.25 mm	
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	19.59 ± 1.52 a	17.23 ± 1.20 a	35.51 ± 1.01 a	64.49 ± 2.16 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	9.16 ± 0.97 b	10.57 ± 2.07 b	13.55 ± 0.76 b	86.45 ± 3.32 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	7.14 ± 0.75 c	8.94 ± 1.32 c	8.83 ± 0.94 c	91.17 ± 2.16 a
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	16.17 ± 1.81 a	18.18 ± 1.93 a	36.61 ± 2.48 a	63.39 ± 3.53 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	8.48 ± 0.66 b	10.52 ± 1.53 b	18.32 ± 1.49 b	81.68 ± 2.41 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	6.03 ± 0.62 c	8.61 ± 1.57 c	15.87 ± 1.17 c	84.13 ± 4.20 a
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	15.17 ± 1.34 a	19.65 ± 0.93 a	36.86 ± 2.25 a	63.14 ± 2.23 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	7.28 ± 1.03 b	8.26 ± 1.15 b	26.80 ± 1.76 b	73.20 ± 2.18 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	5.37 ± 0.92 c	8.22 ± 1.78 b	25.74 ± 2.22 c	74.26 ± 3.24 a

注: 不同小写字母表示各土层不同生草类型之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in the same column of the same soil depth mean significant different among treatment under different grass types. The same below.

不同处理土壤团聚体粒径组成均呈“V”型趋势, 粒径在 1 ~ 2 mm 的最少。生草处理土壤以 > 5 mm 粒级团聚体居多 (28.52% ~ 35.14%), 3 ~ 5 mm 粒级团聚体次之 (20.08% ~ 25.01%), 其他粒级团聚体较少, 表明生草处理土壤机械稳定性团聚体以大团聚体为主; 清耕对照处理土壤以 < 0.25 mm 粒级团聚体居多 (35.51% ~ 36.86%), 0.5 ~ 1 mm 和 0.25 ~ 0.5 mm 粒级团聚体次之 (15.17% ~ 19.59%、17.23% ~ 19.65%), 其他粒级团聚体较少, 表明清耕对照土壤机械稳定性团聚体以微团聚体为主。随着土层深度的增加, 呈现出大团聚体含量逐渐减少, 微团聚体含量逐渐增加的趋势。大团聚体比重 $R_{0.25}$ 总体为黑麦草处理 > 白三叶草处理 > 对照处理, 表明生草处理有利于大团聚体的形成, 且黑麦草处理明显优于白三叶草处理。

2.1.2 水稳性团聚体组成

水稳性团聚体较非水稳性团聚体对于保持土壤稳定状态更具有重要价值 (徐香菇和汪景宽, 2017)。从表 2 可以看出, ‘南丰蜜橘’ 果园土壤中没有测定出 > 5 mm 粒级的水稳性团聚体, 均以 < 0.25 mm 粒级团聚体为优势粒级, 含量变化范围为 55.71% ~ 80.47%; 而 1 ~ 2 mm 粒级团聚体含量最低, 为 1.25% ~ 4.37%。生草处理 > 0.25 mm 大团聚体含量均多于对照, 其顺序为黑麦草处理 > 白三叶草处理 > 对照处理, 表明生草处理有利于表层土壤水稳性团聚体含量的保持, 且黑麦草处理明显优于白三叶草处理。随着土层深度的增加, 生草处理土壤水稳性团聚体中 > 0.25 mm 大团聚体含量逐渐减少。

表 2 不同生草类型下土壤水稳性团聚体组成
Table 2 Composition of soil water-stable aggregates under different grass types %

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction			
		> 5 mm	3 ~ 5 mm	2 ~ 3 mm	1 ~ 2 mm
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	0	5.45 ± 0.38 b	3.51 ± 0.26 c	1.25 ± 0.02 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	0	9.92 ± 0.72 a	7.56 ± 0.29 b	2.16 ± 0.06 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	0	10.13 ± 1.53 a	12.27 ± 1.01 a	4.37 ± 0.01 a
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	0	4.87 ± 0.26 c	3.27 ± 0.31 c	1.25 ± 0.02 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	0	6.43 ± 0.84 b	5.48 ± 0.30 b	1.34 ± 0.02 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	0	8.22 ± 1.07 a	10.14 ± 0.99 a	1.35 ± 0.02 a
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	0	3.70 ± 0.27 b	3.10 ± 0.17 b	1.25 ± 0.02 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	0	4.43 ± 0.25 a	4.06 ± 0.18 a	1.38 ± 0.06 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	0	3.81 ± 0.62 b	4.04 ± 0.73 a	1.55 ± 0.04 a
土层/cm Soil layer	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction			$R_{0.25}$
		0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	< 0.25 mm	
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	6.04 ± 0.63 b	10.19 ± 0.97 c	73.56 ± 2.16 a	26.44 ± 2.33 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	8.45 ± 1.13 a	14.13 ± 1.18 a	57.78 ± 1.26 b	42.22 ± 2.47 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	6.16 ± 0.24 b	11.36 ± 1.15 b	55.71 ± 2.28 c	44.29 ± 1.74 a
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	4.51 ± 0.70 c	8.26 ± 0.73 c	77.84 ± 2.53 a	22.16 ± 2.19 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	8.36 ± 1.42 a	13.54 ± 1.26 a	64.85 ± 1.37 b	35.15 ± 1.36 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	6.93 ± 0.37 b	11.86 ± 1.93 b	61.50 ± 3.12 c	38.50 ± 2.23 a
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	4.25 ± 0.27 b	7.23 ± 0.97 c	80.47 ± 3.08 a	19.53 ± 1.89 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	5.06 ± 0.41 a	8.02 ± 1.46 b	77.05 ± 1.57 b	22.95 ± 1.65 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	4.89 ± 0.35 ab	9.17 ± 1.31 a	76.54 ± 2.14 b	23.46 ± 1.38 a

2.2 不同生草类型对土壤团聚体稳定性的影响

2.2.1 土壤团聚体破坏率

团聚体破坏率 (PAD) 是表征土壤团聚体在水力作用下分散程度的度量指标, 其值越小表明土壤团聚体水力学稳定性越高。从图 1 可以看出, 在 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层中, 生草处理较对照显著降低了团聚体破坏率, 白三叶草处理较对照分别降低了 13.29%、12.41%, 黑麦草处理较对照

分别降低了 12.85%、16.61%；在 20~40 cm 土层中，生草处理与对照团聚体破坏率差异不显著，表明南丰蜜橘园生草对 20 cm 以下土层土壤团聚体破坏率影响较小。

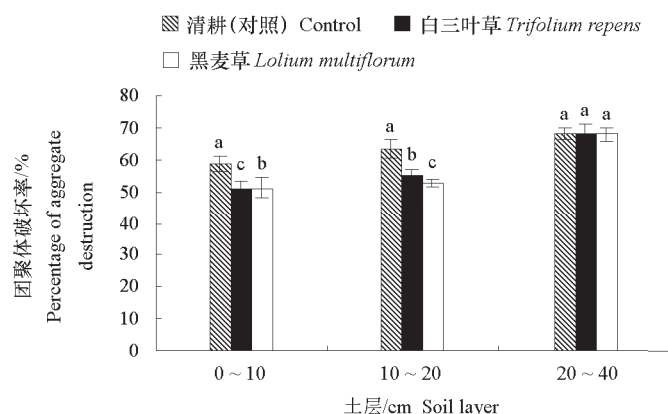


图 1 不同生草类型下土壤团聚体破坏率
Fig. 1 Percentage of soil aggregate destruction under different grass types

2.2.2 土壤团聚体分形维数

由表 3 可知，生草处理显著降低了机械稳定性团聚体分形维数，在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中，白三叶草和黑麦草处理分别较对照降低了 3.21%、2.13%和 4.64%、4.26%，且黑麦草处理显著低于白三叶草处理；在 20~40 cm 土层中，白三叶草和黑麦草处理均较对照降低了 3.51%。土壤水稳性团聚体分形维数在 0~10 cm 土层中对照处理 > 生草处理，在 10~20、20~40 cm 土层中差异不显著。总体来看，南丰蜜橘园生草有利于降低果园土壤团聚体分形维数，且黑麦草处理优于白三叶草处理。随着土层深度增加，分形维数呈现出增大的趋势。

表 3 不同生草类型下土壤分形维数 (D)
Table 3 Soil fractal dimension (D) under different grass types

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	机械稳定性团聚体 Mechanically stable aggregate	水稳性团聚体 Water stable aggregate
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	2.80 ± 0.02 a	2.86 ± 0.10 a
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	2.71 ± 0.11 b	2.72 ± 0.08 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	2.67 ± 0.08 c	2.71 ± 0.06 b
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	2.82 ± 0.08 a	2.87 ± 0.09 a
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	2.76 ± 0.04 b	2.83 ± 0.07 ab
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	2.70 ± 0.09 c	2.82 ± 0.06 ab
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	2.85 ± 0.07 a	2.87 ± 0.08 a
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	2.75 ± 0.03 b	2.84 ± 0.01 ab
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	2.75 ± 0.05 b	2.85 ± 0.05 a

2.2.3 土壤团聚体平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)

从表 4 可知，生草处理较对照显著提高了机械稳定性团聚体 MWD，白三叶草和黑麦草处理在 0~10 和 10~20 cm 土层中分别提高了 126.03%、106.8%和 140.41%、125.17%；在 20~40 cm 土层中分别提高了 97.92%和 106.94%。水稳性团聚体 MWD 变化与机械稳定性团聚体一致，白三叶草和黑麦草处理在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中较对照处理分别显著提高了 57.69%、31.25%和 82.69%、64.58%；在 20~40 cm 土层中差异不显著。‘南丰蜜橘’果园土壤团聚体 GMD 与 MWD 变化趋势一致，且水稳性团聚体的 GMD 和 MWD 小于机械稳定性团聚体的相应值。

表 4 不同生草类型下土壤团聚体平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)
Table 4 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of mechanically stable aggregate and water stable aggregate under different grass types

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	机械稳定性团聚体 Mechanically stable aggregate		水稳性团聚体 Water stable aggregate	
		MWD	GMD	MWD	GMD
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	1.46 ± 0.07 c	0.37 ± 0.03 b	0.52 ± 0.02 c	0.22 ± 0.01 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	3.30 ± 0.09 b	1.38 ± 0.07 ab	0.82 ± 0.04 b	0.32 ± 0.04 ab
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	3.51 ± 0.11 a	1.46 ± 0.05 a	0.95 ± 0.02 a	0.34 ± 0.05 a
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	1.47 ± 0.02 c	0.38 ± 0.07 b	0.48 ± 0.03 c	0.20 ± 0.03 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	3.04 ± 0.10 b	1.23 ± 0.02 ab	0.63 ± 0.02 b	0.26 ± 0.02 ab
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	3.31 ± 0.07 a	1.39 ± 0.04 a	0.79 ± 0.04 a	0.31 ± 0.04 a
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	1.44 ± 0.09 b	0.35 ± 0.02 b	0.43 ± 0.01 ab	0.17 ± 0.02 ab
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	2.85 ± 0.10 ab	1.23 ± 0.09 a	0.48 ± 0.02 a	0.20 ± 0.01 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	2.98 ± 0.03 a	1.29 ± 0.07 a	0.46 ± 0.02 a	0.19 ± 0.01 a

2.3 不同生草类型对土壤有机碳含量的影响

2.3.1 土壤总有机碳含量

从表 5 可知, ‘南丰蜜橘’ 果园生草总体使土壤总有机碳含量增加, 有利于土壤有机碳的积累。在 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层中, 与对照相比, 白三叶草处理使土壤总有机碳分别提高了 13.25%、12.48%和 10.82%, 黑麦草处理分别提高了 4.98%、5.59%和 3.01%。说明生草能增加土壤总有机碳含量, 且白三叶草处理明显优于黑麦草处理。

2.3.2 土壤水稳性团聚体有机碳含量

从表 5 可知, 不同生草处理显著影响土壤团聚体内有机碳的分布。

表 5 不同生草类型下土壤团聚体有机碳含量
Table 5 Organic carbon content of soil aggregates under different grass types

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	总有机碳 Total organic carbon	不同粒级水稳性团聚体 Water stable aggregates of different size					
			3 ~ 5 mm	2 ~ 3 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1.0 mm	0.25 ~ 0.50 mm	< 0.25 mm
0 ~ 10	清耕 (对照) Control	10.64 ± 0.36 c	11.16 ± 1.23 c	10.51 ± 1.35 c	9.08 ± 1.53 b	8.54 ± 1.27 b	10.29 ± 1.43 b	10.88 ± 0.52 c
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	12.05 ± 0.45 a	14.69 ± 1.25 a	13.72 ± 1.03 a	10.06 ± 0.91 a	9.18 ± 0.95 a	11.36 ± 1.06 a	12.07 ± 0.76 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	11.17 ± 0.32 b	12.70 ± 2.63 b	12.65 ± 1.24 b	9.65 ± 1.86 ab	9.13 ± 1.07 a	11.34 ± 1.24 a	11.26 ± 1.01 b
10 ~ 20	清耕 (对照) Control	10.02 ± 0.40 c	11.04 ± 1.01 c	10.27 ± 0.92 c	9.00 ± 0.97 ab	8.95 ± 0.72 a	9.26 ± 0.73 b	10.54 ± 1.03 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	11.27 ± 0.45 a	13.05 ± 1.37 a	13.14 ± 2.76 a	9.83 ± 0.72 a	8.97 ± 0.42 a	10.86 ± 1.93 a	11.95 ± 1.23 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	10.58 ± 0.37 b	11.95 ± 1.72 b	12.48 ± 1.37 b	9.64 ± 1.72 a	9.01 ± 1.25 a	10.94 ± 1.07 a	11.01 ± 0.88 ab
20 ~ 40	清耕 (对照) Control	9.98 ± 0.28 c	10.59 ± 1.35 c	9.99 ± 1.14 c	9.01 ± 1.27 b	8.94 ± 0.35 a	9.23 ± 1.71 b	10.24 ± 0.26 b
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	11.06 ± 0.35 a	12.67 ± 1.49 a	11.24 ± 1.43 a	9.97 ± 0.32 a	8.98 ± 0.37 a	11.04 ± 1.11 a	11.48 ± 1.28 a
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	10.28 ± 0.39 b	11.45 ± 1.28 b	10.56 ± 2.17 b	9.44 ± 1.41 ab	9.06 ± 1.32 a	11.02 ± 1.25 a	11.17 ± 1.32 a

总体上看, 生草处理水稳性团聚体有机碳含量随着粒径的减小呈现出先下降后上升的趋势, 其中 3 ~ 5 mm 粒级团聚体有机碳含量最高, 0.5 ~ 1 mm 团聚体最低。在 0 ~ 10 cm 土层中, 生草处理

较对照提高了各粒级团聚体中有机碳含量, 其中白三叶草处理使粒级 3~5、2~3、1~2、0.5~1.0、0.25~0.50 和 < 0.25 mm 团聚体有机碳分别提高了 31.63%、30.54%、10.79%、7.49%、10.39%和 10.94%; 黑麦草处理提高了 13.80%、20.36%、6.28%、6.91%、10.20%和 3.49%, 说明生草能增加土壤各粒级团聚体有机碳含量, 且白三叶草处理优于黑麦草处理。从垂直分布方面看, 生草处理表层土壤团聚体有机碳含量差异 (0~10 cm 平均增幅 13.57%) 较下层更为明显 (10~20 cm 平均增幅 12.20%, 20~40 cm 平均增幅 10.28%), 表明生草对表层土壤团聚体有机碳含量的影响更为显著。

2.3.3 土壤水稳性团聚体有机碳相对贡献率

从表 5 和表 6 可知, 各处理 < 0.25 mm 粒级土壤水稳性团聚体有机碳含量虽然明显低于 3~5 mm 团聚体有机碳含量, 但由于其比例高, 对有机碳贡献率最大, 变化幅度为 56.16%~83.17%。生草处理显著提高了 3~5、2~3 mm 团聚体有机碳贡献率, 与对照相比, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中, 白三叶草处理贡献率增幅分别为 111.73%、148.13%和 38.73%、90.75%, 黑麦草处理增幅分别为 101.75%、300.58%和 72.81%、257.01%; 在 20~40 cm 土层中, 白三叶草处理 3~5 mm、2~3 mm 团聚体有机碳贡献率增幅为 29%、56.77%, 黑麦草处理增幅为 7.9%、52.9%, 除白三叶草处理 2~3 mm 团聚体与黑麦草处理间差异不显著, 其他处理间差异显著。

表 6 不同生草类型下土壤水稳性团聚体有机碳的相对贡献率
Table 6 Relative contributions of organic carbon in soil aggregates under different grass types %

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	不同粒级水稳性团聚体 Water stable aggregates of different size					
		3~5 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.50 mm	< 0.25 mm
0~10	清耕 (对照) Control	5.71 ± 0.72 c	3.47 ± 0.41 c	1.07 ± 0.06 b	4.85 ± 0.53 b	9.85 ± 0.78 c	75.22 ± 4.16 a
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	12.09 ± 1.14 a	8.61 ± 0.43 b	1.80 ± 0.05 b	6.44 ± 0.27 a	13.32 ± 1.17 a	57.88 ± 3.89 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	11.52 ± 1.12 b	13.90 ± 1.08 a	3.78 ± 0.16 a	5.03 ± 0.25 b	11.53 ± 0.96 b	56.16 ± 3.17 b
10~20	清耕 (对照) Control	5.37 ± 0.82 c	3.35 ± 0.41 c	1.12 ± 0.03 a	4.03 ± 0.08 b	7.63 ± 0.813 b	76.44 ± 3.92 a
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	7.45 ± 0.93 b	6.39 ± 0.76 b	1.17 ± 0.03 a	6.65 ± 0.53 a	13.05 ± 1.01 a	68.76 ± 3.42 b
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	9.28 ± 0.83 a	11.96 ± 1.06 a	1.23 ± 0.01 a	5.90 ± 0.36 ab	12.26 ± 1.08 ab	64.00 ± 2.97 c
20~40	清耕 (对照) Control	3.93 ± 0.07 c	3.10 ± 0.05 b	1.13 ± 0.06 ab	3.81 ± 0.04 ab	6.69 ± 0.10 c	82.57 ± 4.37 a
	白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	5.07 ± 0.38 a	4.86 ± 0.20 a	1.24 ± 0.08 a	4.11 ± 0.19 a	8.00 ± 0.92 b	79.98 ± 3.75 ab
	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	4.24 ± 0.20 b	4.74 ± 0.17 a	1.42 ± 0.81 a	4.31 ± 0.32 a	9.83 ± 1.00 a	83.17 ± 4.43 a

2.4 土壤团聚体平均质量直径、几何平均直径、破坏率与其有机碳含量的相关分析

由表 7 可知, 土壤团聚体 MWD 和 GMD 与 1~5 mm 粒级团聚体有机碳含量之间均呈现出正相关, 与 < 1 mm 粒级团聚体有机碳含量相关性不显著, 说明团聚体稳定性受较大粒级团聚体有机碳含量影响大, 其含量越高, 土壤团聚体稳定性越强, 土壤结构越稳定。PAD 与 0.5~5 mm 粒级团聚体有机碳含量成极显著或显著负相关, 说明 0.5~5 mm 级别团聚体有机碳含量的增加, 可显著降低团聚体破坏程度, 提高团聚体的稳定性。

表 7 不同级别团聚体有机碳含量与团聚体稳定性之间的关系
Table 7 Correlation of different aggregate-associated carbon and aggregate stability

指标 Index	各粒级团聚体有机碳含量 Aggregates organic carbon content of different size						MWD	GMD
	3~5 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.50 mm	< 0.25 mm		
MWD	0.914**	0.901**	0.833*	0.741	0.655	0.735		
GMD	0.910**	0.897**	0.827*	0.722	0.643	0.726	0.964**	
PAD	- 0.918**	- 0.884**	- 0.723	- 0.809*	- 0.701	- 0.651	- 0.932**	- 0.941**

注: *表示在 0.05 水平下显著相关, **表示在 0.01 水平下显著相关。

Note: * Indicates significant correlation at the 0.05 level, ** Indicates significant correlation at the 0.01 level.

2.5 不同生草类型对果实品质的影响

从表 8 可知, 不同生草类型对‘南丰蜜橘’果实品质指标有显著影响。与对照相比, 除果实硬度差异不显著外, 生草栽培总体可以增加可溶性糖、可溶性固形物和维生素 C 含量, 降低可滴定酸含量, 说明果园生草能明显改善果实鲜食品质。白三叶草处理的可溶性糖和可溶性固形物含量明显高于黑麦草处理。

表 8 不同生草类型下果实品质
Table 8 Fruit quality of Nanfeng tangerine under different grass types

处理 Treatment	硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$) Firmness	可溶性糖/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Soluble sugar	可滴定酸/% Titratable acid	可溶性固形物/% Soluble solid	维生素 C/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Vitamin C
清耕 (对照) Control	$1.17 \pm 0.03 \text{ a}$	$117.22 \pm 8.34 \text{ c}$	$0.94 \pm 0.03 \text{ b}$	$13.90 \pm 0.96 \text{ c}$	$178.57 \pm 10.11 \text{ b}$
白三叶草 <i>Trifolium repens</i>	$1.15 \pm 0.02 \text{ a}$	$130.78 \pm 6.79 \text{ a}$	$0.74 \pm 0.06 \text{ a}$	$15.13 \pm 0.96 \text{ a}$	$190.32 \pm 10.09 \text{ a}$
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	$1.16 \pm 0.01 \text{ a}$	$125.31 \pm 4.13 \text{ b}$	$0.75 \pm 0.06 \text{ a}$	$14.60 \pm 0.77 \text{ b}$	$189.64 \pm 10.13 \text{ a}$

3 讨论

3.1 生草对南丰蜜橘果园土壤团聚体及稳定性的影响

土壤团聚体可划分为大团聚体 ($> 0.25 \text{ mm}$) 和微团聚体 ($< 0.25 \text{ mm}$)。不同类型果园生草栽培试验结果表明, 生草栽培可对果园土壤团聚体及其稳定性产生积极影响 (Agulhon, 1996; 王义祥等, 2012)。本研究中发现, ‘南丰蜜橘’果园生草后明显提高了土壤 $> 0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量, 主要集中在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中, 生草处理平均增幅分别达到 37.71%、30.79% 和 63.60%、66.18%, 这是由于生草处理既减少了人为对果园土壤扰动的频率和强度, 又增加了新鲜有机物质的输入, 促进了植物根系、土壤动物、微生物活动, 使它们的代谢产物增多, 土壤中有胶结物质和载体介质的量增加, 从而促进了大团聚体的形成。此结论与大多数前人研究结果基本一致, 但与王英俊等 (2013) 的间作白三叶草未对苹果园土壤 $> 0.25 \text{ mm}$ 粒级机械稳定性团聚体含量产生明显影响的结论不同, 其主要原因可能与土壤类型、气候条件等因素有关。各处理下土壤水稳定性团聚体组成均以 $< 0.25 \text{ mm}$ 微团聚体为主, 含量变化范围为 55.71% ~ 80.47%, 明显高于机械稳定性团聚体 (8.83% ~ 36.86%) 的幅度变化范围, 其主要原因可能与试验区为沙质土壤有关。同时, 在 $0 \sim 10$ 和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中, 禾本科类牧草黑麦草处理使 $> 0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量增幅分别达到 41.37%、32.72% 和 67.51%、73.74%, 明显高于豆科类牧草白三叶草处理的 34.05%、28.85% 和 59.68%、58.62%, 其差异可能是由于牧草的根系及生物量不同造成的。

团聚体的稳定性直接影响土壤表层的水、土界面行为, 稳定性越好, 越有利于土壤对水分、养分的转化。团聚体平均质量直径越大, 结构体破碎率越低, 表示团聚体的团聚度越高, 稳定性越强, 越有益于果树生长 (Six et al., 2004; 陆琪 等, 2019)。本研究中发现, 生草提高了土壤团聚体 MWD、GMD, 降低了 PAD, 在 $0 \sim 10$ 和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层具有良好响应, 说明生草栽培不仅增加了南丰蜜橘果园土壤大团聚体数量, 而且有利于提高土壤结构体的稳定性, 改善土壤抗蚀性, 这与王义祥等 (2012) 的研究结果基本一致。在 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层中, 生草处理水稳性团聚体 MWD、GMD 和 PAD 与清耕处理差异不显著, 这可能与果园生草后增加的新鲜有机物质的输入主要在表层土壤中有关系。研究还发现, 土壤团聚体 MWD 与 GMD 变化趋势一致, 且水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 明显小于机械稳定性团聚体的相应值, 说明水蚀可以使南丰蜜橘园土壤大团聚体破碎, 团聚体粒径减小,

这可能与土壤团聚体稳定性胶结剂的胶结作用有关。

3.2 生草对南丰蜜橘果园土壤团聚体有机碳含量的影响

土壤团聚过程是土壤固碳中最为重要的途径之一。本研究中发现,‘南丰蜜橘’果园生草由于增加了果园活地被物,形成了果园复层结构,使输入土壤的有机碳增加。尤其是生草刈割后覆盖的草、根系及根系的分泌物,为土壤有机碳提供了稳定而丰富的来源,使生草土壤中总有机碳含量平均增幅达到 8.36%,这与李会科等(2011)、刘富庭等(2014)、刘灵芝等(2011)研究所得多年生黑麦草使果园土壤有机质升高的结论基本一致,但与伊兴凯等(2012)研究梨园人工种植毛苕子 3 年未提高果园土壤有机质含量的结论有悖,其原因可能与土壤的类型、种草的时间等因素有关。

土壤各粒级团聚体有机碳含量是果园土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征,对果园土壤碳汇和土壤肥力具有双重意义(王义祥 等, 2012)。本研究中发现,不同粒级团聚体有机碳含量对果园不同类型生草栽培的响应能力不同,表现出明显的差异性,其中豆科类牧草白三叶草处理, 3 ~ 5 mm 粒级水稳性团聚体有机碳含量增幅最大(31.63%), 0.5 ~ 1.0 mm 粒级增加幅度较少(7.49%);禾本科类牧草黑麦草处理 2 ~ 3 mm 粒级水稳性团聚体有机碳含量增幅最大(20.36%), < 0.25 mm 粒级增加幅度较少(3.49%),这主要是由于生草改变了果园土壤有机质的数量、质量以及所处的微环境条件,进而影响不同粒级团聚体有机碳的含量及稳定性,但由于不同生草类型向土壤输入的新鲜有机物不同,导致土壤不同粒级团聚体有机碳含量变化不一样,也影响着较小团聚体与较大团聚体之间的转化。

不同团聚体具有特定的孔隙特征,以及不同粒级团聚体碳源数量与质量的差异,影响有机介质的持久性及有机质的亲水性和疏水性物质的比例,进而影响团聚体的稳定性(张帅 等, 2015; 陆琪等, 2019)。相关性分析表明,团聚体稳定性与其有机碳含量成正相关关系,团聚体破坏率与其有机碳含量成负相关关系,尤其团聚体稳定性受 3 ~ 5、2 ~ 3 和 1 ~ 2 mm 团聚体有机碳含量影响大,其含量越高,土壤团聚体稳定性越强,土壤结构越稳定。生草栽培对果园土壤团聚体有机碳的影响是导致团聚体形成及其稳定性变化的重要原因。但有关果园土壤团聚体质量和数量、稳定性变化与团聚体有机碳的含量、分布及果树生长发育之间的相互关系还有待进一步探讨。

4 结论

生草栽培对‘南丰蜜橘’果园土壤团聚体及其稳定性会产生积极的影响,减少人为干扰,促进大团聚体形成,提高土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),降低团聚体破坏率(PAD)和分形维数,改善土壤结构的稳定性;改变土壤团聚体有机碳含量与分布,较大幅度提高了 0 ~ 10 cm 表层土层水稳性团聚体总有机碳和各粒级团聚体有机碳含量,且团聚体 MWD 和 GMD 与各粒级团聚体有机碳含量之间均呈现正相关, PAD 与各粒级团聚体有机碳含量之间均呈现负相关;同时还可以提高南丰蜜橘果实可溶性糖、可溶性固形物和维生素 C 含量,提升果实鲜食品质,有效解决长期清耕制对果园带来的负面危害,促进果业可持续发展。

References

- Agulhon R. 1996. Advantage of new methods maintaining grapevine soils for viticulture, oenology, the environment and health. *Progrès Agricole et Viticole*, 113 (12): 275 – 278.
- Bai Long, Chen Xue, Wang Zhou, Lü De-guo, Zhao Bo. 2015. The effects of different grass species on soil nitrogen mineralization in apple orchard.

- Acta Horticulturae Sinica, 42 (12): 2469 - 2477. (in Chinese)
- 白 龙, 陈 雪, 王 洲, 吕德国, 赵 波. 2015. 苜蓿和老芒麦生草对苹果园土壤氮素矿化的影响. 园艺学报, 42 (12): 2469 - 2477.
- Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R. 2011. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamicx and soil organic carbon and nitrogen accumulation. Soil Biology & Biochemistry, 43 (3): 657 - 666.
- Ding Ming-hua, Tu Yi-sheng. 2012. Study on fruit qualities and sucrose-metabolizing enzymes in *Citrus-reticulata* Blanco var. *kinokuni* (Tanaka) from six different places. Journal of Anhui Agriculture Science, 40 (17): 9233 - 9235, 9238. (in Chinese)
- 丁明华, 涂艺声. 2012. 不同产地南丰蜜橘果实品质和蔗糖代谢相关酶研究. 安徽农业科学, 40 (17): 9233 - 9235, 9238.
- Fu Xue-qin, Liu Ju-er, Huang Wen-xin. 2015. Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng tangerine yard. Acta Horticulturae Sinica, 42 (8): 1551 - 1558. (in Chinese)
- 付学琴, 刘璐珥, 黄文新. 2015. 南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响. 园艺学报, 42 (8): 1551 - 1558.
- Gao W D, Zhou T Z, Ren T S. 2015. Conversion from conventional to no tillage alters thermal stability of organic matter in soil aggregates. Soil Science Society of America Journal, 21 (6): 1455 - 1464.
- Li He-sheng. 2000. Plant physiology biochemistry experiment principle and technology. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- Li Hua, Hui Zu-mei, Zhang Zhen-wen, Huang Yi, Li Er-hu. 2004. Effect of green covering on soil fertility and grape leaf nutrient content of vineyard. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 20 (S1): 116 - 119. (in Chinese)
- 李 华, 惠竹梅, 张振文, 黄 懿, 李二虎. 2004. 行间生草对葡萄园土壤肥力和葡萄叶片养分的影响. 农业工程学报, 20 (S1): 116 - 119.
- Li Hui-ke, Li Jin-ling, Wang Lei-cun. 2011. Effects of interspecific interaction on the growth and distribution of roots in apple-white clover intercropping system. Acta Agrestia Sinica, 19 (6): 960 - 968. (in Chinese)
- 李会科, 李金玲, 王雷存. 2011. 种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响. 草地学报, 19 (6): 960 - 968.
- Li Xia. 2014. Effects of enclosure management on soil organic carbon and aggregate stability of desert-steppe in Ningxia [Ph D. Dissertation]. Yinchuan: Ningxia University. (in Chinese)
- 李 侠. 2014. 封育对宁夏荒漠草原土壤有机碳及团聚体稳定性的影响 [博士论文]. 银川: 宁夏大学.
- Liu Futing, Zhang Linsen, Li Xuwei, Li Bingzhi, Han Mingyu, Gu Jie, Wang Xiaolin. 2014. Effects of inter-row planting grasses on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Weibei dryland. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 20 (2): 355 - 363. (in Chinese)
- 刘富庭, 张林森, 李雪薇, 李丙智, 韩明玉, 谷 洁, 王晓琳. 2014. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响. 植物营养与肥料学报, 20 (2): 355 - 363.
- Liu Ling-zhi, Lü De-guo, Qin Si-jun, Ma Huai-yu, Du Guo-dong, Liu Guo-cheng. 2011. Carbon catabolic characteristics about the soil dominant bacteria from 'Hanfu' apple orchard with herbage-mulching management. Acta Horticulturae Sinica, 38 (10): 1837 - 1846. (in Chinese)
- 刘灵芝, 吕德国, 秦嗣军, 马怀宇, 杜国栋, 刘国成. 2011. 生草覆盖 '寒富' 苹果园土壤优势细菌的碳代谢特征研究. 园艺学报, 38 (10): 1837 - 1846.
- Lu Qi, Ma Hong-bin, Yu Hong-qian, Wang Li, Shen Yan, Xu Dong-mei, Xie Ying-zhong. 2019. Effects of rotational grazing methods on soil aggregates and organic carbon characteristics in desert steppe. Chinese Journal of Applied Ecology, 30 (9): 3028 - 3038. (in Chinese)
- 陆 琪, 马红彬, 俞鸿千, 王 丽, 沈 艳, 许冬梅, 谢应忠. 2019. 轮牧方式对荒漠草原土壤团聚体及有机碳特征的影响. 应用生态学报, 30 (9): 3028 - 3038.
- Lu Ru-kun. 2000. Chemical analysis method of soil in agriculture. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- Ou H P, Liu X Y, Chen Q S, Huang Y F, He M J, Tan H W, Xu F L, Li Y R, Gu M H. 2016. Water-stable aggregates and associated carbon in a subtropical, rice soil under variable tillage. Revista Brasileira De Ciêncin Solo, 40: e0150145.
- Pan Gen-xing, Zhou Ping, Li Lian-qing, Zhang Xu-hui. 2007. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration. Acta Pedologica Sinica, 44 (12): 328 - 337. (in Chinese)
- 潘根兴, 周 萍, 李恋卿, 张旭辉. 2007. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 44 (12): 328 - 337.
- Six J, Bossuyt H, Degryze S. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil

- & Tillage Research, 79: 7 – 31.
- Six J, Elliott ET, Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turn-over and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 2099 – 2103.
- Wang Yao-feng, Shao Ling-ling, Liu Yu-xue, Lü Hao-hao, Chen Qing-fei, Liao Min, Yang Sheng-mao. 2014. Effects of interplanting grass on soil organic carbon and active components of carbon pool in peach orchard. *Acta Ecologica Sinica*, 34 (20): 6002 – 6010. (in Chinese)
- 王耀锋, 邵玲玲, 刘玉学, 吕豪豪, 陈庆飞, 廖敏, 杨生茂. 2014. 桃园生草对土壤有机碳及活性碳库组分的影响. *生态学报*, 34 (20): 6002 – 6010.
- Wang Yi-xiang, Weng Bo-qi, Huang Yi-bin, Wang Cheng-ji, Ye Jing. 2012. Effects of sod cultivation in orchard on distributions of soil aggregates and soil organic carbon of aggregates. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 20 (4): 349 – 355. (in Chinese)
- 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌, 王成己, 叶菁. 2012. 生草栽培对果园土壤团聚体及其有机碳分布的影响. *热带亚热带植物学报*, 20 (4): 349 – 355.
- Wang Ying-jun, Li Tong-chuan, Zhang Dao-yong, Jia Man-li, Li Hui-ke, Cao Wei-dong. 2013. Effects of intercropping white clover on soil aggregates and soil organic carbon of aggregates in apple-white clover intercropping system. *Acta Agrestia Sin*, 21 (3): 485 – 493. (in Chinese)
- 王英俊, 李同川, 张道勇, 贾曼莉, 李会科, 曹卫东. 2013. 间作白三叶对苹果 / 白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响. *草地学报*, 21 (3): 485 – 493.
- Wei Ya-wei, Su Yi-rong, Chen Xiang-bi, He Xun-yang, Qin Wen-geng, Wei Guo-fu. 2011. Effects of human disturbance on soil aggregates content and their organic C stability in Karst regions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22 (4): 971 – 978. (in Chinese)
- 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 何寻阳, 覃文更, 韦国富. 2011. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响. *应用生态学报*, 22 (4): 971 – 978.
- Xu Guo-xin, Wang Zi-fang, Gao Ming, Tian Dong, Huang Rong, Liu Jiang, Li Jia-cheng. 2018. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration. *Environmental Science*, 39 (1): 355 – 362. (in Chinese)
- 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成. 2018. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响. *环境科学*, 39 (1): 355 – 362.
- Xu Xiang-ru, Wang Jing-kuan. 2017. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon. *Chinese Journal of Soil Science*, 48 (6): 1523 – 1529. (in Chinese)
- 徐香茹, 汪景宽. 2017. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展. *土壤通报*, 48 (6): 1523 – 1529.
- Yi Xing-kai, Zhang Jin-yun, Gao Zheng-hui, Pan Hai-fa, Xu Yi-liu, Chen Jia-hong. 2012. Effect of different covering ways on the soil nutrition and fruit quality in Dangshansu pear garden. *Journal of Northwest Agriculture & Forestry University (Natural Science Edition)*, 40 (10): 161 – 166. (in Chinese)
- 伊兴凯, 张金云, 高正辉, 潘海发, 徐义流, 陈加红. 2012. 不同覆盖方式对砀山酥梨园土养分及果实品质的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 40 (10): 161 – 166.
- Zhang Shuai, Xu Ming-xiang, Zhang Ya-feng, Wang Chao-hua, Chen Gai. 2015. Effects of land use change on soil active organic carbon in deep soils in hilly loess plateau region of northwest China. *Environmental Science*, 36 (2): 661 – 668. (in Chinese)
- 张帅, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 陈盖. 2015. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响. *环境科学*, 36 (2): 661 – 668.
- Zhu G Y, Shangguan Z P, Deng L. 2017. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. *Catena*, 149: 253 – 260.