

‘南丰蜜橘’园生草对土壤团聚体养分和微生物特性及果实品质的影响

付学琴¹, 陈登云², 杨星鹏¹, 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:【目的】探明生草对橘园土壤团聚体养分特性和微生物特性的影响, 为构建合理的土壤管理模式提供科学依据。【方法】以‘南丰蜜橘’园为研究对象, 分析行间播种白三叶草、黑麦草和清耕条件下土壤团聚体养分含量、微生物生物量、微生物功能多样性和活性的差异。【结果】与清耕对照比, 生草栽培显著提高了土壤团聚体有机碳、全氮、全磷、全钾、硝态氮、速效磷、速效钾和微生物量碳、氮、磷的含量以及呼吸强度、多样性指数($p < 0.05$), 黑麦草处理团聚体平均增幅分别为 112.37%、29.44%、63.00%、80.68%、24.39%、21.96%、111.09%、69.95%、12.73%、26.28%、27.58%、20.35%, 白三叶草处理团聚体平均增幅分别为 122.57%、55.29%、57.62%、54.97%、44.54%、23.83%、65.17%、94.47%、42.68%、22.06%、28.02%、22.12%。生草能明显提高果实可溶性糖、可溶性固形物和维生素 C 含量, 降低可滴定酸含量。【结论】生草栽培提高了橘园土壤各粒径团聚体的养分含量和微生物量碳、氮、磷含量, 增加了橘园土壤团聚体微生物功能多样性和代谢活性, 提升了橘园土壤肥力和健康状况, 进而改善了‘南丰蜜橘’鲜食品质。

关键词: ‘南丰蜜橘’园; 果园生草; 团聚体; 养分特性; 微生物特性

中图分类号: S666.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2020)11-1655-12

Effects of grass cover in ‘Nanfeng’ tangerine orchard on nutrients and microbial characteristics in soil aggregates and fruit quality

FU Xueqin¹, CHEN Dengyun², YANG Xingpeng¹, GAN Yanyun³, HUANG Wenxin⁴

(¹College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China; ²Gaoan Agricultural Bureau, Gaoan 330800, Jiangxi, China; ³Xinyu Agriculture and Rural Affairs Bureau, Xinyu 330046, Jiangxi, China; ⁴Jiangxi Agriculture and Rural Affairs Department, Nanchang 330046, Jiangxi, China)

Abstract: 【Objective】 ‘Nanfeng’ tangerine is a well-known citrus variety in China. ‘Nanfeng’ tangerine is popular in the market and has been widely cultivated in many regions. In 2018, ‘Nanfeng’ tangerine cultivation area reached 78 000 hm² with a production of 1.35 million tons. However, due to the long-term traditional orchard cleaning practice, a series of ecological and environmental problems such as reduced soil quality, reduced fertility, increased pests and diseases, and soil erosion have resulted in serious impacts on ‘Nanfeng’ tangerine productivity, quality, and thus profit. Grass cover is an advanced orchard management, which can significantly increase soil organic matter and nutrients, improve orchard soil quality, repair orchard ecological environment, improve fruit yield and quality, effectively solve problems caused by long-term cleaning of orchards. This experiment used traditional orchard cultivation methods (clean cultivation) as the control to examine the effects of grass cover treatments on nutrient and microbial characteristics of the soil aggregates in ‘Nanfeng’ tangerine orchard. 【Methods】 Three treatments including ryegrass as the cover grass (T1), white clover as cover grass (T2), and orchard cleaning as the control (CK) were set in the experiment, which was of one-factor randomized block design with 3 biological replicates. In late July 2019, the five-point sampling method

收稿日期: 2020-03-14 接受日期: 2020-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(31760547); 江西省重点研发计划项目(20181BBF60003); 江西省教育厅科技研究项目(2018)

作者简介: 付学琴, 女, 副教授, 研究方向: 植物根际微生态。Tel: 18170819503, E-mail: 1203826333@qq.com

was used for sample collecting. 0-20 cm soil layer sample was taken 30 to 40 cm away from the trunk of the trees. The contents of soil aggregates of different sizes (<0.25 mm, 0.25-0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-5 mm and > 5 mm) were determined using the thermosieve method. Soil organic carbon content was measured using the method of external thermal oxidation of potassium dichromate under low temperature. Soil total nitrogen content was determined with Kjeldahl method and nitrate nitrogen content with a dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry. Total phosphorus and available phosphorus contents were measured with the molybdenum antimony colorimetry, and total potassium and available potassium contents with the flame photometric method. Soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus contents were determined by chloroform fumigation extraction method. Soil basal respiration intensity was measured indoor with closed culture method. Functional diversity of soil microbial communities was measured with the BIOLOG ecological test board.【Results】Soil $R_{0.25}$ in various treatments followed a pattern of T1> T2> CK. Grass cover treatments were favorable for the formation of large soil aggregates. Compared with CK, grass cultivation increased soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, nitrate nitrogen, available phosphorus, and available potassium. Their average increase was 112.37%, 29.44%, 63.00%, 80.68%, 24.39%, 21.96%, 111.09%, respectively in T1 and 122.57%, 55.29%, 57.62%, 54.97%, 44.54%, 23.83% and 65.17% respectively, in T2. The contents of microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus increased significantly in soil aggregates ($p < 0.05$), and their average increase was 69.95%, 12.73% and 26.28% respectively in T1 and 94.47%, 42.68%, and 22.06% respectively in T2. The respiration intensity of soil aggregates was enhanced remarkably ($p < 0.05$) and the average increase was 27.58% and 28.02% in T1 and T2, respectively. Species richness index, dominance index, and evenness index of microbial communities increased in the soil aggregates under grass cultivation. The contents of soil carbon, nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen in T2 were significantly higher than in T1 ($p < 0.05$), while the contents of phosphorus and potassium in soil aggregates displayed an opposite pattern. The contents of organic carbon, nitrate nitrogen, available phosphorus, microbial biomass carbon and nitrogen in 3-5 mm aggregates were significantly higher than those in the other sized agglomerates under different treatments. The basal respiration intensity of 3-5 mm, 2-3 mm and 1-2 mm aggregates under grass cultivation was significantly higher than that of the other sized aggregates. Naturally grown grass increased soluble sugars, soluble solids and vitamin C and reduce titratable acid.【Conclusion】Planting white clover had a better effect in increasing carbon and nitrogen in soil aggregates but was less effective in increasing phosphorus and potassium than planting ryegrass. Grass cover had a prominent effect in increasing the carbon, nitrogen, and phosphorus in soil aggregates (3-5 mm) and in improving the microbial activity of aggregates (>1 mm). Grass cultivation promoted the formation of large aggregates in the soil in Nanfeng tangerine orchard. It could effectively increase the nutrient content and microbial biomass in soil aggregates of various sizes, enhance the carbon fixation of aggregates and microbial diversity and activity, and thereby improve soil fertility and fruit quality of 'Nanfeng' tangerine.

Key words: 'Nanfeng' tangerine orchard; Orchard sod culture; Aggregates; Nutrient characteristics; Microbial characteristics

土壤团聚体是土壤矿物颗粒和有机物质通过胶结、黏结和凝聚等作用而形成的不同尺度的多孔结构体,其数量、大小及结构不仅直接影响着土壤的孔隙度、持水性、抗蚀性,而且与土壤有机质分解转化

和腐殖质形成关系密切^①。不同粒径土壤团聚体不仅在理化性质、养分供应状况方面存在一定的差异,而且团聚体中的微生物多样性和活性也有所不同,然而土壤团聚体微生物又在土壤有机质分解转化过

程中发挥着重要作用^[2-4]。土壤团聚体、土壤有机质、土壤微生物三者之间关系非常密切,土壤团聚体结构为土壤微生物提供生长环境,进而影响着土壤有机质转化与养分汇集;土壤有机质又影响着土壤团聚体分布组成和稳定性,对改善土壤结构、增强土壤缓冲能力以及保证植物和土壤微生物的生命代谢活动都有着非常重要的作用;而土壤微生物又通过分解转化土壤中的有机质,直接参与土壤团聚体的形成,并影响着土壤团聚体的分布、结构和稳定性^[1,5-7]。因此,研究不同粒径果园土壤团聚体中养分特征和微生物特性对于改善果园土壤结构和提升果园肥力都具有重要的意义。

当前,‘南丰蜜橘’园在长期清耕管理模式下,不仅出现了果园土壤质量下降、肥力降低、土壤侵蚀以及病虫害加重等一系列生态环境问题,而且严重影响了‘南丰蜜橘’的产量、品质以及种植效益^[8]。生草栽培可以明显增加土壤有机质和养分,提升果园土壤质量,修复果园生态环境,提高果品产量、品质和种植经济效益,有效解决长期清耕对果园带来的负面危害^[9-11]。目前国内外学者对生草栽培条件下果园土壤理化性质、养分含量与微生物多样性和活性开展了一系列的研究。姜莉莉等^[12]发现,行间种植长柔毛野豌豆能够改善苹果园土壤微生态环境,在一定程度上增加果园土壤有机质及养分含量。闫文涛等^[13]发现,生草栽培果园在保持土壤肥力、修复果园生态、提升昆虫丰富程度等方面明显优于清耕果园。霍颖等^[14]发现,果园常年生草后,果园0~20 cm和20~40 cm土层中全氮、全磷含量均比清耕对照显著提高。龙妍等^[15]通过间种生草试验表明,种草可以提高果园土壤中的微生物总量,增强土壤酶的活性,其中间种紫花苜蓿的效果最为显著。杜毅飞等^[16]生草栽培试验表明,生草能够改善果园土壤微生物的种类、均匀度和活力,进而增加土壤微生物对碳源的利用能力。但是目前还没有关于生草栽培对果园不同粒径土壤团聚体的养分特性及微生物特性的报道。

针对以上问题,笔者以果园传统清耕方式为对照,开展不同生草类型对‘南丰蜜橘’园土壤团聚体养分特性及微生物特性影响的研究,旨在探明‘南丰蜜橘’园生草后土壤团聚体养分和微生物变化特征,为解决当前‘南丰蜜橘’生产中存在的系列问题,构建合理的果园土壤管理模式提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本试验于2010—2019年在江西抚州‘南丰蜜橘’研究基地进行。该基地位于东经116°24′,北纬26°35′,属亚热带季风气候,年均降水量1 700 mm,年均气温18.3℃,年均日照数1 928.2 h,无霜期长269 d左右。橘园为低丘缓坡地,面积约20 hm²,土壤有机质含量(w,后同)9.25 g·kg⁻¹,全氮含量4.02 g·kg⁻¹,全磷含量0.20 g·kg⁻¹,全钾含量3.96 g·kg⁻¹,碱解氮含量57.14 mg·kg⁻¹,速效磷含量39.28 mg·kg⁻¹,速效钾含量18.22 mg·kg⁻¹,pH值4.70。‘南丰蜜橘’树龄(嫁接后)15 a(年),株行距4.5 m×5 m。

1.2 试验设计

试验设种植禾本科类牧草黑麦草(T1)、豆科类牧草白三叶草(T2)和清耕对照(CK)3个处理,单因素随机区组设计,每个处理设3次重复,每个处理小区面积为1.0 hm²。生草栽培于2010年春季进行,行间连续10 a播种,撒播草种量平均为30 kg·hm⁻²,每年刈草2次(5月和11月中下旬),就地覆盖;清耕处理定期中耕除草。各处理其他管理措施基本一致,常规管理。

1.3 样品采集

2019年7月下旬在各处理小区按五点法取土壤样品。在离橘树主茎中心30~40 cm处,用土钻取0~20 cm土层土样,去除地表枯体和残茬后,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,风干过程中沿土壤自然裂隙轻轻掰成10 mm左右的小土团,剔除根系、石头等杂物,在阴凉处风干备用。

2019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。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤团聚体组成 采用温筛法测定>5 mm、3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1、0.25~0.5 mm和<0.25 mm各粒级土壤团聚体含量。

1.4.2 土壤理化性质 采用重铬酸钾低温外热氧化法测定土壤有机碳含量,采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量,采用双波长紫外分光光度法测定硝态氮含量,采用钼锑抗比色法测定全磷和速效磷含量,采用火焰光度法测定全钾和速效钾含量^[17]。

1.4.3 土壤微生物生物量碳、氮、磷和呼吸强度 采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物生物量碳、氮、磷含量^[18],采用室内密闭培养法测定土壤基础呼吸强度^[19]。

1.4.4 土壤微生物群落功能多样性 土壤微生物碳源利用多样性采用 BIOLOG 生态测试板测定。Bio-log-ECO 微生平板的总体颜色变化用平均颜色变化率 (Average Well Color Development, AWCD) 表示。其计算公式为:

$$AWCD = \sum (C_i - R) / n$$

式中, C_i 为所测得的除对照孔外的 93 个反应孔的吸光度值; R 为对照孔的吸光度; n 为 ECO 板碳源底物的种类, $n=31$ 。

利用培养 96 h 后的吸光值数据计算土壤微生物群落功能多样性指数,计算方法参照 Magurran^[20]的方法。

1.4.5 ‘南丰蜜橘’品质 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^[21]。

1.5 数据处理

采用 V7.55 版 DPS 软件进行方差分析和相关性

分析。

2 结果与分析

2.1 不同生草类型对各粒级团聚体分布的影响

从表 1 中可以看出,‘南丰蜜橘’园土壤中没有测定出 >5 mm 粒级的水稳性团聚体。‘南丰蜜橘’园土壤水稳性团聚体均以 <0.25 mm 粒级团聚体为优势粒级,含量变化范围为 57.76%~73.27%。1~2 mm 粒级水稳性团聚体含量最低,含量变化范围为 1.25%~3.38%。与清耕对照相比,除黑麦草处理 0.5~1.0 mm 粒级团聚体含量与对照差异不显著外,其他处理粒级团聚体含量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$);黑麦草处理和白三叶草处理之间除 3~5 mm 粒级团聚体含量差异不显著外,其他粒级团聚体含量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。总体来看, $R_{0.25}$ 总体变化为黑麦草处理 > 白三叶草处理 > 清耕对照处理,且不同处理之间差异均达到显著水平 ($p < 0.05$),表明生草处理减少了对‘南丰蜜橘’园土壤的干扰,有利于大团聚体的形成,能够有效改善土壤结构的稳定性,增加土壤抗风蚀能力,提升土壤质量,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。

2.2 不同生草类型对土壤养分特性的影响

表 1 不同生草类型下土壤水稳性团聚体组成

Table 1 Composition of water-stable soil aggregates under different grass covers

%

处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction /mm							$R_{0.25}$
	>5	3~5	2~3	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25	
CK	0	5.15±0.38 b	3.72±0.25 c	1.25±0.02 c	6.57±0.67 b	10.04±0.97 c	73.27±2.28 a	26.73±2.15 c
T1	0	9.13±1.53 a	12.06±1.01 a	3.38±0.05 a	6.46±0.24 b	11.21±1.15 b	57.76±2.31 c	42.24±1.72 a
T2	0	8.93±0.72 a	5.56±0.29 b	2.01±0.07 b	8.41±1.12 a	14.01±1.18 a	61.08±1.26 b	38.92±2.47 b

注:同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among treatments ($p < 0.05$).

从表 2 可以看出,对于‘南丰蜜橘’园土壤有机碳在 3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 团聚体中分布,与清耕对照相比,黑麦草和白三叶草处理增幅范围分别为 96.48%~124.00%、106.67%~136.67%,平均增幅分别为 112.37%、122.57%,差异显著 ($p < 0.05$),说明生草能显著增加橘园土壤团聚体有机碳含量。白三叶草处理不同粒级团聚体中平均有机碳含量也显著高于黑麦草处理 ($p < 0.05$),说明白三叶草处理对增加‘南丰蜜橘’园土壤团聚体有机碳含量效果优于黑麦

草处理。‘南丰蜜橘’园土壤全氮、全磷、全钾、硝态氮、速效磷、速效钾在 3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 团聚体中的分布,与清耕对照相比,黑麦草处理含量增幅范围分别为 27.02%~31.38%、56.52%~66.67%、63.79%~109.91%、17.47%~42.58%、11.86%~29.03%、92.47%~124.60%,平均增幅分别为 29.44%、63.00%、80.68%、24.39%、21.96%、111.09%;白三叶草处理增幅范围分别为 52.78%~57.14%、54.55%~61.90%、45.18%~64.09%、38.15%~67.61%、12.36%~31.71%、44.53%~

表 2 不同生草类型对土壤各粒级团聚体中养分含量的影响

Table 2 Effects of different grass covers on soil nutrient in different size soil aggregates

项目 Particle size	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction/mm					
		3~5	2~3	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
w(有机碳) SOC content/(g·kg ⁻¹)	CK	11.16±1.23 cA	10.51±1.35 cB	9.08±1.53 bC	8.54±1.27 bD	8.39±1.43 bD	8.48±0.52 cD
	T1	22.70±2.63 bA	20.65±1.24 bB	19.65±1.86 abC	19.13±1.07 aC	18.34±1.24 aD	18.26±1.01 bD
	T2	23.69±1.25 aA	21.72±1.03 aB	20.06±0.91 aC	19.48±0.95 aC	19.36±1.06 aC	20.07±0.76 aC
w(全氮) Total N content/(g·kg ⁻¹)	CK	3.92±0.20 cB	4.05±0.11 cA	3.92±0.18 cB	3.96±0.27 cB	3.91±0.19 cB	3.92±0.14 cB
	T1	5.14±0.24 bB	5.26±0.78 bA	5.15±1.01 bB	5.03±1.11 bB	5.02±0.56 bB	5.05±0.85 bB
	T2	6.16±1.02 aB	6.23±0.98 aA	6.09±1.36 aB	6.05±1.13 aB	6.14±0.79 aB	6.10±0.93 aB
w(全磷) Total P content/(g·kg ⁻¹)	CK	0.23±0.02 bA	0.22±0.04 bA	0.23±0.03 bA	0.21±0.03 bA	0.21±0.05 bA	0.22±0.04 bA
	T1	0.37±0.12 aA	0.36±0.11 aA	0.36±0.09 aA	0.35±0.08 aA	0.35±0.12 aA	0.36±0.18 aA
	T2	0.36±0.08 aA	0.35±0.07 aA	0.36±0.13 aA	0.34±0.09 aA	0.33±0.17 aA	0.34±0.06 aA
w(全钾) Total K content/(g·kg ⁻¹)	CK	4.75±0.27 bA	4.58±0.25 bAB	4.98±0.21 cA	4.02±0.21 cB	3.98±0.21 cB	3.23±0.21 cC
	T1	7.78±1.32 aAB	7.59±1.79 aAB	8.20±2.06 aA	7.53±1.33 aAB	7.67±1.35 aAB	6.78±2.06 aB
	T2	7.06±1.54 abAB	7.13±1.65 abA	7.23±1.43 bA	6.51±2.71 bAB	6.14±1.89 bB	5.30±1.05 bC
w(硝态氮) NO ₃ ⁻ -N content/(mg·kg ⁻¹)	CK	62.37±2.19 cA	59.02±3.73 cB	54.27±2.15 cB	50.11±2.03 cC	50.36±3.26 cC	42.30±2.77 cD
	T1	77.93±4.73 bA	71.68±3.45 bB	65.13±3.29 bC	60.06±2.96 bD	59.16±4.49 bD	60.31±2.73 bD
	T2	90.19±4.23 aA	81.56±3.43 aB	75.32±2.17 aC	70.11±2.36 aD	69.57±3.42 aD	70.90±4.47 aD
w(速效磷) Available P content/(mg·kg ⁻¹)	CK	48.36±3.37 bA	39.55±2.79 bB	40.26±3.17 bB	39.81±4.13 cB	39.65±2.19 bB	40.13±4.51 bB
	T1	60.07±1.26 aA	51.03±3.56 aB	50.93±2.73 aB	45.27±2.39 bC	50.12±3.64 aB	44.89±3.14 aC
	T2	61.22±3.63 aA	52.09±3.34 aB	50.77±3.75 aBC	49.28±2.48 aBC	48.55±2.86 abBC	45.09±2.33 aC
w(速效钾) Available K content/(mg·kg ⁻¹)	CK	25.22±1.43 cA	20.20±2.09 cB	20.41±1.76 cB	18.72±2.45 cBC	18.71±2.18 cBC	16.24±2.33 cC
	T1	48.54±2.96 aA	45.37±2.68 aB	45.38±2.76 aB	39.83±4.36 aC	38.99±2.15 aC	33.45±2.88 aD
	T2	36.94±2.29 bA	36.45±3.58 bA	32.44±2.13 bAB	33.72±3.55 bAB	30.28±1.79 bB	26.42±2.64 bC

注:同一列不同小写字母表示同一粒级团聚体处理间差异显著,同行不同大写字母表示不同生草处理模式下不同粒级团聚体之间差异显著($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments of the same size agglomerate, and different capital letters in the same row indicate significant differences among different size agglomerates in different grass cultivation treatments($p < 0.05$).

82.87%, 平均增幅分别为 55.29%、57.62%、54.97%、44.54%、23.83%、65.17%, 差异均达到显著水平($p < 0.05$), 说明生草能显著增加橘园土壤团聚体氮磷钾含量, 改善土壤养分供应状况。黑麦草处理不同粒级团聚体中全磷、速效磷和全钾、速效钾平均含量显著高于白三叶草处理($p < 0.05$), 全氮、硝态氮平均含量显著低于白三叶草处理($p < 0.05$), 说明黑麦草处理对增加‘南丰蜜橘’园土壤团聚体磷钾供应效果好于白三叶处理, 而土壤团聚体氮素供应效果差于白三叶处理。

团聚体粒级大小影响橘园土壤团聚体中养分的分布。从表 2 中可以看出, 橘园土壤中 3~5 mm 粒级团聚体有机碳、硝态氮、速效磷的含量显著高于其他粒级团聚体($p < 0.05$); 全磷、速效钾含量高于其他粒级团聚体, 但差异不完全显著。橘园土壤中 2~3 mm 粒级团聚体全氮含量显著高于其他粒级团聚体($p < 0.05$)。橘园土壤中 1~2 mm 粒级团聚体全钾

含量高于其他粒级团聚体, 但差异不显著。

土壤有机碳与全氮的比值(C/N 比值)影响碳和氮循环, 可作为土壤质量评价指标之一。从表 3 可以看出, 在 3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 团聚体中分布, 黑麦草和白三叶草处理 C/N 比值均高于清耕对照, 增幅范围分别为 29.47%~75.93%、34.74%~52.31%, 平均增幅分别为 59.76%、43.05%, 差异显著($p < 0.05$), 说明生草能显著提高‘南丰蜜橘’园土壤 C/N 比值。黑麦草处理不同粒级团聚体中平均 C/N 比值显著高于白三叶草处理($p < 0.05$), 说明黑麦草处理比白三叶草处理对提高‘南丰蜜橘’园土壤 C/N 比值效果更明显。同一处理不同粒径团聚体 C/N 比值也具有一定差异。黑麦草处理 2~3 mm 粒径团聚体 C/N 比值最高(3.93), <0.25 mm 粒径团聚体 C/N 比值最低(3.62); 白三叶草和清耕对照 3~5 mm 粒径团聚体 C/N 比值最高, 分别为 3.84、2.85; 0.25~0.5 mm 粒径团聚

表3 不同生草类型对土壤各粒级团聚体 C/N 的影响
Table 3 Effects of different grass covers on soil C/N in soil aggregates of different size

处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregate fraction/mm					
	3~5	2~3	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
CK	2.85	2.60	2.32	2.16	2.15	2.16
T1	3.69	3.93	3.82	3.80	3.65	3.62
T2	3.84	3.48	3.29	3.22	3.15	3.29

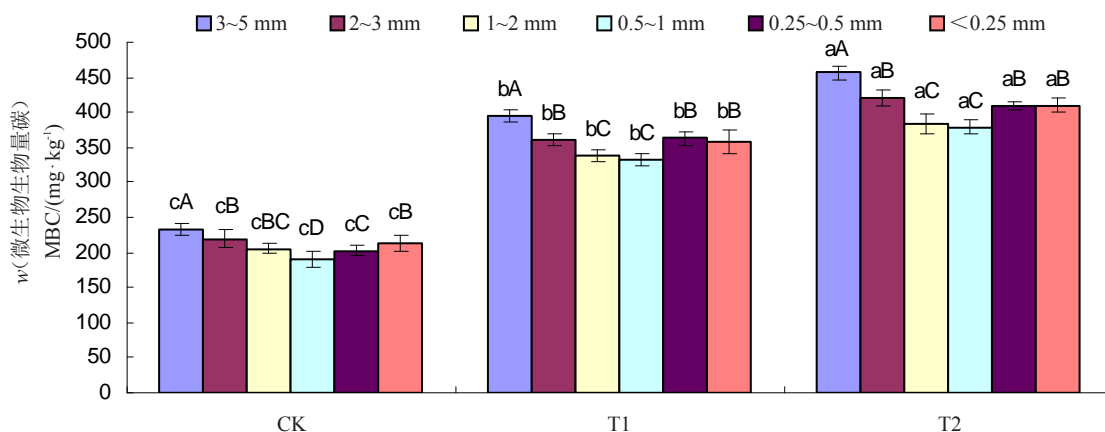
体C/N比值最低,分别为3.15、2.15。

2.3 不同生草类型对土壤团聚体微生物特性的影响

2.3.1 不同生草类型对土壤团聚体微生物生物量碳含量的影响 从图1可知,黑麦草处理、白三叶草处理和清耕对照土壤微生物生物量碳含量变化范围分

别为332.78~394.72 mg·kg⁻¹、378.84~456.43 mg·kg⁻¹、190.28~233.54 mg·kg⁻¹。橘园土壤微生物生物量碳在3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm和<0.25 mm团聚体中的分布,与清耕对照相比,黑麦草和白三叶草处理增幅范围分别为64.40%~78.92%、86.56%~101.97%,平均增幅分别为69.95%、94.47%,差异显著($p < 0.05$),说明生草能显著增加‘南丰蜜橘’园土壤团聚体中微生物生物量碳含量。白三叶草处理团聚体中平均微生物生物量碳含量显著高于黑麦草处理($p < 0.05$),说明白三叶草处理对增加‘南丰蜜橘’园土壤团聚体中微生物生物量碳含量效果优于黑麦草处理。

团聚体粒级大小影响着橘园土壤团聚体中微生物生物量碳的分布。从图1可以看出,除黑麦草处



不同小写字母表示不同处理同一粒级团聚体差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体间差异显著($p < 0.01$)。下同。

Different small letters indicate significant difference among the same size aggregates of different treatments ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant difference among the different size aggregates of the same treatment ($p < 0.01$). The same below.

图1 不同生草类型对土壤团聚体微生物生物量碳含量的影响

Fig. 1 Effect of different grass types on soil microbial biomass carbon (MBC) in soil aggregates

理0.25~0.5 mm粒级团聚体外,其他团聚体中微生物生物量碳含量随团聚体粒级减小呈先下降后上升的趋势。不同处理橘园土壤中3~5 mm粒级团聚体微生物生物量碳含量最高,显著高于其他粒级团聚体($p < 0.05$)。清耕对照橘园土壤中0.5~1 mm粒级团聚体微生物生物量碳含量最低,黑麦草和白三叶草处理橘园土壤中1~2 mm和0.5~1 mm粒级团聚体微生物生物量碳含量较低,显著低于其他粒级团聚体($p < 0.05$)。

2.3.2 不同生草类型对土壤团聚体微生物生物量氮含量的影响 从图2可知,黑麦草处理、白三叶草处理和清耕对照土壤团聚体微生物生物量氮含量变化范

围分别为21.69~32.45 mg·kg⁻¹、26.34~40.86 mg·kg⁻¹、19.47~27.31 mg·kg⁻¹。橘园土壤微生物生物量氮在3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm和<0.25 mm团聚体中的分布,与清耕对照相比,黑麦草和白三叶草处理增幅范围分别为10.09%~18.82%、35.29%~49.62%,平均增幅分别为12.73%、42.68%,差异显著($p < 0.05$),说明生草能显著增加‘南丰蜜橘’园土壤团聚体中微生物生物量氮的含量。白三叶草处理团聚体中平均微生物生物量氮含量显著高于黑麦草处理($p < 0.05$),说明白三叶草处理对增加‘南丰蜜橘’园土壤微生物生物量氮含量的效果优于黑麦草处理。

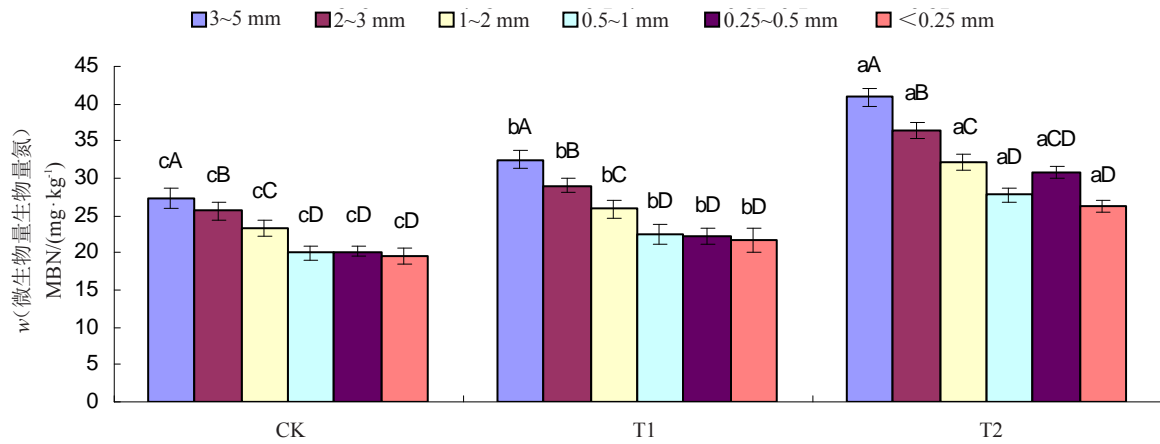


图 2 不同生草类型对土壤团聚体微生物生物量氮含量的影响

Fig. 2 Effect of different grass types on soil microbial biomass nitrogen (MBN) in soil aggregates

团聚体粒级大小影响橘园土壤团聚体中微生物生物量氮的分布。从图 2 可以看出,除白三叶草处理 0.25~0.5 mm 粒级团聚体外,其他团聚体中微生物生物量氮含量随团聚体粒级减小呈逐渐下降的趋势。不同处理橘园土壤中 3~5 mm 粒级团聚体微生物生物量氮含量最高,显著高于其他粒级团聚体 ($p < 0.05$)。黑麦草和清耕对照处理橘园土壤中 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 粒级团聚体微生物生物量氮含量较低,白三叶草处理橘园土壤中 0.5~1 mm 和 <0.25 mm 粒级团聚体微生物生物量氮含量较低,显著低于其他粒级团聚体 ($p < 0.05$)。

2.3.3 不同生草类型对土壤团聚体微生物生物量磷含量的影响 从图 3 可知,黑麦草处理、白三叶草处理和清耕对照土壤微生物生物量磷含量变化范围分别为 66.80~72.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、60.38~72.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、50.93~59.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。橘园土壤微生物生物量磷在

3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 团聚体中的分布,与清耕对照相比,黑麦草和白三叶草处理增幅范围分别为 21.13%~36.97%、18.24%~29.96%,平均增幅分别为 26.28%、22.06%,差异显著 ($p < 0.05$),说明生草能显著增加‘南丰蜜橘’园土壤团聚体中微生物生物量磷含量。黑麦草与白三叶草处理团聚体中平均有机磷含量差异不显著。

团聚体粒级大小影响橘园土壤团聚体中微生物生物量磷的分布。从图 3 可以看出,除清耕对照 0.25~0.5 mm 粒级团聚体、黑麦草处理 <0.25 mm 粒级团聚体、白三叶草处理 1~2 mm 粒级团聚体外,其他团聚体中微生物生物量磷含量随团聚体粒级减小呈逐渐下降的趋势。不同处理橘园土壤中 3~5 mm、2~3 mm 和 1~2 mm 粒级团聚体微生物生物量磷含量较高,显著高于其他粒级团聚体 ($p < 0.05$)。白

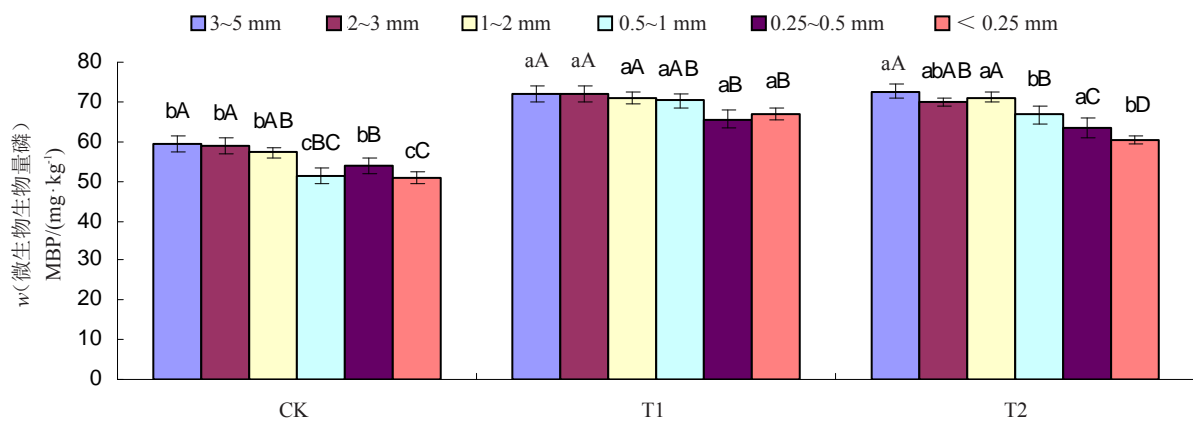


图 3 不同生草类型对土壤团聚体中微生物生物量磷含量的影响

Fig. 3 Effect of different grass types on soil microbial biomass Phosphorus (MBP) in soil aggregates

三叶草和清耕对照橘园土壤中 <0.25 mm 粒级团聚体微生物生物量磷含量最低,黑麦草处理橘园土壤中 $0.25\sim 0.5$ mm 和 <0.25 mm 粒级团聚体微生物生物量磷含量较低,显著低于其他粒级团聚体($p < 0.05$)。

2.3.4 不同生草类型对土壤团聚体呼吸特征的影响 土壤基础呼吸强度在一定程度上可以用来反映土壤微生物对有机质的转化速率。从图4可知,黑麦草处理、白三叶草处理和清耕对照橘园土壤呼吸强度变化范围分别为 $55.43\sim 65.64$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $54.67\sim 65.48$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $45.76\sim 50.52$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。与清耕对照相比,黑麦草和白三叶草处理 $3\sim 5$ mm、

$2\sim 3$ mm、 $1\sim 2$ mm、 $0.5\sim 1$ mm、 $0.25\sim 0.5$ mm 和 <0.25 mm 粒级土壤呼吸强度增幅范围分别为 $21.13\%\sim 31.287\%$ 、 $19.47\%\sim 33.99\%$,平均增幅分别为 27.58% 、 28.02% ,差异显著($p < 0.05$),说明生草能显著增强‘南丰蜜橘’园土壤呼吸强度。黑麦草与白三叶草处理团聚体中土壤呼吸强度差异不显著。团聚体粒级大小影响橘园土壤团聚体呼吸强度的分布。从图4可以看出,除白三叶草处理 $1\sim 2$ mm 粒级团聚体外,其他团聚体呼吸强度随团聚体粒级减小呈先下降后上升的趋势。黑麦草处理、白三叶草处理和清耕对照 $0.25\sim 0.5$ mm 粒级团聚体呼吸强度最小,与其他粒级团聚体呼吸强度差异显著($p < 0.05$)。

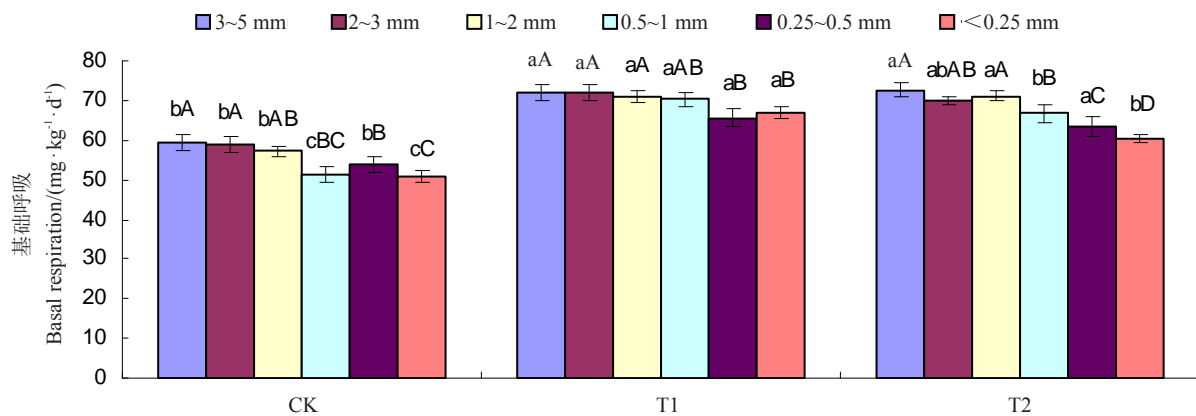


图4 不同生草类型对土壤团聚体基础呼吸强度的影响

Fig. 4 Effect of different grass types on soil basal respiration in soil aggregates

呼吸熵是基础呼吸强度与微生物量碳之间的比值,可用来表征土壤生境成熟度。从图5可知,生草处理‘南丰蜜橘’园土壤呼吸熵值明显低于清耕对照,差异显著($p < 0.05$),说明生草栽培有利于果园土壤微生物生长繁殖。团聚体粒级大小影响橘园土壤团聚体呼吸熵的分布。从图5可以看出,除黑麦

草和白三叶草处理 <0.25 mm 粒级团聚体外,其他团聚体呼吸熵随团聚体粒级减小呈先上升后下降的趋势。清耕对照 $0.5\sim 1$ mm 粒级团聚体呼吸熵值最高,与其他粒级团聚体比差异显著($p < 0.05$)。黑麦草处理 $2\sim 3$ mm 和 $1\sim 2$ mm 粒级团聚体呼吸熵值较高,与其他粒级团聚体比差异显著($p < 0.05$)。

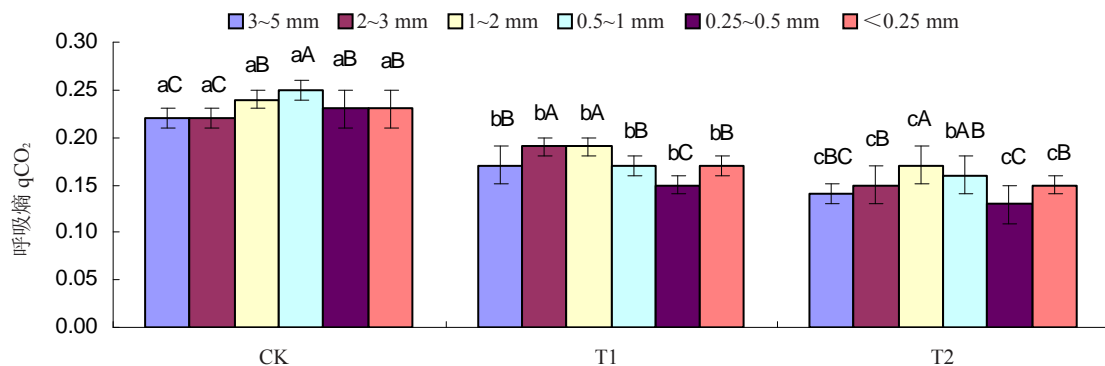


图5 不同生草类型对土壤团聚体呼吸熵的影响

Fig. 5 Effect of different grass types on $q\text{CO}_2$ of soil aggregates

白三叶草处理 1~2 mm 粒级团聚体呼吸熵值较高,与其他粒级团聚体比差异显著($p < 0.05$)。

2.3.5 不同生草类型对土壤团聚体微生物功能多样性的影响 平均每孔颜色变化率(AWCD值)是用来表征土壤微生物对单一碳源利用能力的一个重要指标。从图6可以看出,培养144 h,AWCD值随着时间增加而逐渐增大,表明橘园土壤微生物对底物碳源的利用能力总体逐步增强。在培养12 h内橘园土壤微生物代谢活性增加不明显,12 h以后橘园土壤微生物代谢活性逐渐增强,说明此时碳源开始被橘园土壤微生物大幅度利用。132 h后AWCD值增加速率趋于平缓。在整个培养期间,生草处理与清耕对照比AWCD值的变化速度和最终峰值均有不同程度的增加,其大小顺序为白三叶草处理>黑麦草处理>清耕对照,说明生草栽培可提高‘南丰蜜橘’园土壤微生物活性。方差分析表明,白三叶草和

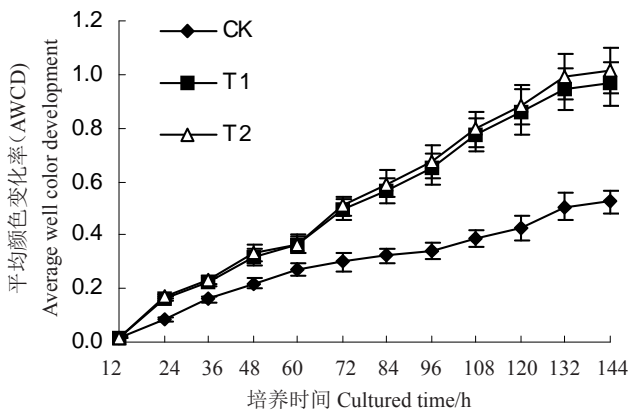


图6 不同生草类型土壤团聚体微生物群落 AWCD 动态变化

Fig. 6 Dynamics of AWCD of the soil microbial community in different grass covers treatment

黑麦草处理与清耕对照之间差异显著($p < 0.05$),白三叶草和黑麦草处理之间差异不显著。

由表4可知,生草处理橘园土壤微生物群落的物种丰富度指数、优势度指数和均匀度指数增加,变化趋势一致,大小顺序均为白三叶草处理>黑麦草处理>清耕对照。与清耕对照比,生草处理可以显著提高橘园土壤微生物多样性指数($p < 0.05$),黑麦草和白三叶草处理分别提高20.35%、22.12%。不同生草类型橘园土壤微生物群落多样性指数差异不显著。

表4 不同生草类型对土壤微生物群落功能多样性指数的影响

Table 4 Effects of different grass covers on the functional diversity indexes of the soil microbial community

处理 Treatment	香农多样性指数 Shannon index	辛普森指数 Simpson index	McIntosh 指数 McIntosh index
CK	1.13±0.08 b	0.91±0.01 a	2.13±0.35 a
T1	1.36±0.11 a	0.92±0.01 a	2.26±0.48 a
T2	1.38±0.09 a	0.93±0.05 a	2.29±0.71 a

注:同一列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。后同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among treatments($p < 0.05$). The same below.

2.4 不同生草类型对果实品质的影响

从表5可知,不同生草类型‘南丰蜜橘’果实品质指标存在差异。与对照相比,除果实硬度差异不显著处,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‘南丰蜜橘’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,且差异达到显著水平,说明白三叶草处理对改善‘南丰蜜橘’果实鲜食品质效果优于

表5 不同生草类型对果实品质的影响

Table 5 Fruit quality of Nanfeng tangerine under different treatment

处理 Treatment	硬度 Firmness/(kg·cm ⁻²)	ρ (可溶性糖) Soluble sugar content/(g·100 mL ⁻¹)	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	w(可溶性固形物) Soluble solid content/%	ρ (维生素C) Vitamin C content/(g·100 mL ⁻¹)
CK	1.17±0.03 a	11.72±0.83 c	0.94±0.03 b	13.90±0.96 c	17.86±1.01 b
T1	1.16±0.01 a	12.53±0.41 b	0.75±0.06 a	14.60±0.77 b	18.96±1.01 a
T2	1.15±0.02 a	13.08±0.68 a	0.74±0.06 a	15.13±0.96 a	19.03±1.01 a

黑麦草处理。

3 讨论

3.1 生草栽培对‘南丰蜜橘’园土壤团聚体养分变化特性的影响

土壤团聚体具有水稳性、力稳性和孔性特性,是

果树优质生产所需土壤结构之一。根据 Tisdall 等^[22]提出的团聚体层次模型理论,土壤团聚体在形成过程中,土壤有机质组分会产生分异。本研究发现,不同类型生草‘南丰蜜橘’园土壤有机碳和全氮、全磷、全钾、硝态氮、速效磷、速效钾在 3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 < 0.25 mm 团聚

体中含量均高于清耕对照,说明橘园生草有利于提高土壤团聚体碳和养分的供应能力,这与前人研究结论基本一致^[9,23-24],其主要原因可能是橘园生草形成了果园复层结构,增加了橘园的活地被物,尤其是刈割后覆盖的草、根系和根系分泌物,为橘园土壤中有机碳和氮、磷、钾等养分提供了可靠稳定的重要来源。白三叶处理对提高‘南丰蜜橘’园土壤团聚体有机碳和氮素含量效果明显优于黑麦草处理,这可能与白三叶处理属豆科类牧草,具有固氮作用有关,具体原因还需要进一步研究。同时,有关研究表明,25:1是土壤微生物生命活动C/N最佳比值。当C/N比值低于这一数值时,C/N比值越低则土壤中的有机质分解矿化速率越快,转化产物中的易溶成分若不能及时被植被吸收就会随径流而流失;若C/N比值高于这一数值,则有利于土壤养分的固定^[25-26]。本研究发现,不同类型生草橘园土壤各粒径团聚体C/N比值均高于清耕对照,且C/N比值均未达到25:1,说明生草栽培使得橘园土壤团聚体养分流失减少,汇集有机质的能力增强,具体机制还需要进一步研究。

本研究还发现,橘园同一管理模式下不同粒径土壤团聚体之间的养分含量差异没有不同处理之间明显,但仍能发现橘园3~5 mm 粒级土壤团聚体中有机碳、硝态氮、速效磷含量显著高于其他粒级团聚体,且该粒径土壤团聚体在白三叶草处理和清耕对照土壤中C/N比值最高;2~3 mm 粒级土壤团聚体中全氮含量显著高于其他粒级团聚体,且该粒径土壤团聚体在黑麦草处理土壤中C/N比值最高,所以橘园土壤>2 mm 粒级团聚体最适宜养分积累,这与李秋嘉等^[10]研究1~2 mm 粒级团聚体适宜养分积累结论不完全一致,其原因可能与土壤团聚体物理性质及微生物特性的差异有关。

3.2 生草栽培对‘南丰蜜橘’园土壤团聚体中微生物特性的影响

土壤微生物生物量占总土壤有机质比例仅有1%~3%,但它在调节土壤养分循环和能量流方面发挥着重要作用,并对农田管理措施响应非常敏感,因此可在一定程度上表征农业生态系统稳定性和土壤养分变化^[27-28]。本研究发现,橘园土壤团聚体微生物生物量碳、氮和磷含量表现出相似的趋势,生草栽培措施显著提高了橘园土壤团聚体微生物碳、氮和磷含量,这主要是因为生草栽培不仅为橘园土壤团聚

体中的微生物提供了丰富的碳源、氮源和其他所需养分,有利于微生物生长繁殖,而且还通过改善橘园土壤团聚体分布、土壤孔隙结构等,为橘园土壤团聚体中的微生物提供更好的生境。白三叶草处理团聚体中平均微生物量碳、氮含量显著高于黑麦草处理($p < 0.05$),这与前人大部分研究结果相一致^[6,29-32],其主要原因可能是豆科类牧草的固氮作用,使其根部及残渣的C/N比值下降,加快了橘园土壤中养分的分解,增加了橘园土壤微生物生长繁殖所需养分供应,其具体的转化机制还有待进一步深入研究。本研究还发现,不同橘园土壤管理模式微生物量碳、氮、磷含量均以3~5 mm 粒级团聚体最高,其中微生物生物量碳、氮含量显著高于其他粒级团聚体($p < 0.05$),这一研究结果与Hontoria等^[33]研究得出的微生物量碳在土壤大团聚体中含量最高的结论基本一致,但与荣勤雷等^[34]研究得出的微生物量碳、氮含量在<0.25 mm 土壤团聚体中含量最高的结论不一致,这可能既与团聚体在分级方法上的差异有关,也与土壤类型、果园管理措施不同等密切相关。

土壤基础呼吸和呼吸熵可以作为判断微生物活性和生存状况的重要指标^[19]。本研究发现,清耕处理橘园各粒径土壤团聚体基础呼吸强度均处于较低的状态,生草处理橘园各粒径土壤团聚体基础呼吸强度则明显升高,说明生草栽培使‘南丰蜜橘’园生存环境更适宜微生物生长,橘园土壤中微生物活性得到增强。生草栽培‘南丰蜜橘’园中3~5 mm、2~3 mm 和1~2 mm 粒级土壤团聚体基础呼吸强度较高,显著高于其他粒径($p < 0.05$),表明生草栽培对橘园土壤>1 mm 粒级团聚体中的微生物生存环境和微生物活性改善效果较好。呼吸熵在反映土壤生物质量变化时比土壤呼吸强度受植被生长因素干扰更小,对土壤微生物群落受胁迫程度评价更灵敏科学^[19]。生草栽培橘园中各粒径团聚体呼吸熵相比于清耕橘园,普遍呈现出较低的状态,表明生草栽培使得橘园土壤微生物受胁迫程度降低,橘园土壤生境更为成熟稳定。

土壤微生物群落处在一个动态平衡过程中,任何一个影响土壤理化性质的因子都会在一定程度上干扰土壤微生物群落变化,进而影响土壤微生物的活性、生态功能、土壤肥力以及土壤环境质量^[6-8]。本研究表明,不同类型生草均可以显著提高橘园土壤微生物群落丰富度,但对橘园土壤微生物优势度和

均匀度没有产生明显的影响,这与白文娟等^[35]研究得出各有机肥培肥措施可显著提高微生物群落丰富度的结论基本一致,但与徐华勤等^[36]研究得出的稻草覆盖对茶园土壤微生物群落功能多样性影响并不明显的结论不一致,其原因还有待进一步深入研究。

4 结 论

生草栽培有利于‘南丰蜜橘’园土壤团聚体的形成,提高橘园土壤团聚体的养分含量和微生物生物量,增强橘园土壤团聚体固碳作用及微生物多样性和活性,使橘园土壤生境更为成熟稳定,从而提升橘园土壤肥力与健康状况,有效解决长期清耕制对果园带来的负面影响。生草栽培对改善果园土壤养分效应的影响、微生物生物量C/N比值对土壤肥力的影响以及团聚体粒级分布与养分和微生物学特性之间的内在联系还有待更深入的研究。

参考文献 References:

- [1] GELAW A M, SINGH B R, LAL R. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, northern Ethiopia[J]. *Land Degradation and Development*, 2015, 26(7): 690-700.
- [2] HEMÁNDEZ-HEMÁNDEZ R M, LÓPEZ-HEMÁNDEZ D. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 1563-1570.
- [3] BROOKES P, LANDMAN A, PRUDEN G. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(5): 837-842.
- [4] BENESCH M, GLASER, DIPPOLD M. Soil microbial C and N turnover under cupressus lusitanica, and natural forests in southern ethiopia assessed by decomposition of ¹³C- and ¹⁵N-labelled litter under field conditions[J]. *Plant and Soil*, 2015, 38(8): 133-146.
- [5] 陈苏, 谢建坤, 黄文新, 陈登云, 彭晓剑, 付学琴. ‘南丰蜜橘’园生草对土壤有机碳及其组分的影响[J]. *果树学报*, 2018, 35(3): 285-292.
CHEN Su, XIE Jiankun, HUANG Wenxin, CHEN Dengyun, PENG Xiaojian, FU Xueqin. Effects of sod culture on soil organic carbon and its components in a ‘Nanfeng tangerine’ orchard [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(3): 285-292.
- [6] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 许玉芝. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1625-1632.
LI Na, HAN Xiaozeng, YOU Mengyang, XU Yuzhi. Research review on soil aggregates and microbes[J]. *Ecology and Environment*, 2013, 22(9): 1625-1632.
- [7] 李景, 吴会军, 武雪萍, 蔡典雄, 姚宇卿, 吕军杰, 田云龙. 长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2341-2348.
LI Jing, WU Huijun, WU Xueping, CAI Dianxiong, YAO Yuqing, LÜ Junjie, TIAN Yunlong. Effects of long-term tillage measurements on soil aggregate characteristic and microbial diversity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2341-2348.
- [8] 付学琴, 刘珺珺, 黄文新. ‘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[J]. *园艺学报*, 2015, 42(8): 1551-1558.
FU Xueqin, LIU Ju'er, HUANG Wenxin. Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng Tangerine Yard[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(8): 1551-1558.
- [9] 白龙, 陈雪, 王洲, 吕德国, 赵波. 苜蓿和老芒麦生草对苹果园土壤氮素矿化的影响[J]. *园艺学报*, 2015, 42(12): 2469-2477.
BAI Long, CHEN Xue, WANG Zhou, LÜ Deguo, ZHAO Bo. The effects of different grass species on soil nitrogen mineralization in apple orchard[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(12): 2469-2477.
- [10] 李华, 惠竹梅, 张振文, 黄懿, 李二虎. 行间生草对葡萄园土壤肥力和葡萄叶片养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(S1): 116-119.
LI Hua, XI Zhumei, ZHANG Zhenwen, HUANG Yi, LI Erhu. Effect of green covering on soil fertility and grape leaf nutrient content of vineyard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(S1): 116-119.
- [11] 焦润安, 张舒涵, 李毅, 李朝周, 王建平, 焦健. 生草影响果树生长发育及果园环境的研究进展[J]. *果树学报*, 2017, 34(12): 1610-1623.
JIAO Run'an, ZHANG Shuhan, LI Yi, LI Chaozhou, WANG Jianping, JIAO Jian. Research progress about the effect of sod-culture on the growth and development of fruit and orchard environment [J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(12): 1610-1623.
- [12] 姜莉莉, 宫庆涛, 武海斌, 盛福敬, 孙瑞红. 不同生草处理对苹果园土壤微生物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3482-3490.
JIANG Lili, GONG Qingtao, WU Haibin, SHENG Fujing, SUN Ruihong. Effects of different grasses cultivation on apple orchard soil microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3482-3490.
- [13] 闫文涛, 仇贵生, 张怀江, 孙丽娜, 程存刚, 李壮, 赵德英. 辽西苹果园三种地面管理模式对土壤理化性状和昆虫群落的影响[J]. *果树学报*, 2014, 31(5): 801-808.
YAN Wentao, QIU Guisheng, ZHANG Huaijiang, SUN Lina, CHENG Cungang, LI Zhuang, ZHAO Deying. Effects of three ground management models on soil physical-chemical properties and insect community in apple orchard of western Liaoning [J]. *Journal of Fruit Science*, 2014, 31(5): 801-808.
- [14] 霍颖, 张杰, 王美超, 姚允聪. 梨园行间种草对土壤有机质和矿质元素变化及相互关系的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(7): 1415-1424.
HUO Ying, ZHANG Jie, WANG Meichao, YAO Yuncong. Effects of inter-row planting grasses on variations and relationships of soil organic matter and soil nutrients[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(7): 1415-1424.
- [15] 龙娟, 惠竹梅, 程建梅, 庞学良. 生草葡萄园土壤微生物分布及土壤酶活性研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2007, 35(6): 99-103.
LONG Yan, XI Zhumei, CHENG Jianmei, PANG Xueliang. Ecological distributing of soil microorganisms and activity of soil

- enzymes in vineyard green covering[J]. Journal of Northwest A & F University, 2007, 35(6): 99-103.
- [16] 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧. 生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4260-4267.
- DU Yifei, FANG Kaikai, WANG Zhikang, LI Huike, MAO Pengjuan, ZHANG Xiangxu, WANG Jing. Carbon source utilization characteristics of soil microbial community for apple orchard with interplanting herbage[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 4260-4267.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- LU Rukun. Chemical analysis method of soil in agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [18] RACHID M. Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 119-128.
- [19] 李秋嘉, 薛志婧, 周正朝. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体养分特征及微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 137-145.
- LI Qiuja, XUE Zhijing, ZHOU Zhengchao. Effects of vegetation restoration on nutrient and microbial properties of soil aggregates with different particle sizes in the loess hilly regions of Ningxia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 137-145.
- [20] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement [M]. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI Hesheng. Plant physiology biochemistry experiment principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [22] TISDALL J, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [23] 秦秦, 宋科, 孙丽娟, 孙雅菲, 王峻, 江建兵, 薛永. 猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价[J]. 果树学报, 2020, 37(1): 68-76.
- QIN Qin, SONG Ke, SUN Lijuan, SUN Yafei, WANG Jun, JIANG Jianbing, XUE Yong. Effect of inter-row planting grass on the contents and availability of soil nutrient in kiwifruit orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(1): 68-76.
- [24] 陈学森, 张瑞洁, 王艳廷, 王楠, 姜生辉, 许海峰, 刘静轩, 王得云, 曲常志, 张艳敏, 姜远茂, 毛志泉. 苹果园种植长柔毛野豌豆结合自然生草对土壤综合肥力的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(12): 2325-2334.
- CHEN Xuesen, ZHANG Ruijie, WANG Yanting, WANG Nan, JIANG Shenghui, XU Haifeng, LIU Jingxuan, WANG Deyun, QU Changzhi, ZHANG Yanmin, JIANG Yuanmao, MAO Zhiquan. Effects of growing hairy vetch (*Vicia villosa*) on the soil nutrient, enzyme activities and microorganisms in apple orchard [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(12): 2325-2334.
- [25] NGUYEN T T, CAVAGNARO T R, THANH NGO H T. Soil respiration, microbial biomass and nutrient availability in soil amended with high and low C/N residue: Influence of interval between residue additions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 189-197.
- [26] ARSLAN S, MOHAMMAD H S, MARYAM A. Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying- enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio[J]. Journal of Cleaner Production, 2019: 11:9164.
- [27] JIANG X J, SHI X L, WRIGHT, ALAN L. Seasonal variability of microbial biomass associated with aggregates in a rice-based ecosystem[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 56: 84-88.
- [28] GALVEZ A, SINICCO T, CAYUELA M L, MINGORANCE M D, FORNASIER F, MONDINI C. Short term effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 16(10): 3-14.
- [29] KALLENBACH C, GRANDY A S. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 241-252.
- [30] GOUGOULIAS C, CLARK J M, SHAW L J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2014, 94(12): 2362-2371.
- [31] BRIAR S S, FONTE S J, PARK I. The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 905-914.
- [32] XIE S S, ZHANG W, YE Y Y, ZHAO J WANG K L. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41402.
- [33] HONTORIA C, GÓMEZ P C, MARISCAL S I. Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 42-52.
- [34] 荣勤雷, 李若楠, 黄绍文, 周春火, 唐继伟, 王丽英, 张彦才. 不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1084-1096.
- RONG Qinlei, LI Ruonan, HUANG Shaowen, ZHOU Chunhuo, TANG Jiwei, WANG Liying, ZHANG Yancai. Characteristics of nutrients and microbial biomass in soil aggregates under different fertilization modes in greenhouse vegetable production[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(7): 1084-1096.
- [35] 白文娟, 徐华勤, 章家恩. 不同培肥措施对土壤团聚体中微生物特性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 24-30.
- BAI Wenjuan, XU Huaqin, ZHANG Jia'en. Effects of different manure application on the soil microbial biomass properties within different soil aggregates[J]. Ecology and Environment, 2018, 27(1): 24-30.
- [36] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, SO Hwat Bing. 长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 891-899.
- LI Juan, ZHAO Bingqiang, LI Xiuying, JIANG Ruibo, SO H B. Changes of soil microbial properties affected by different long-term fertilization regimes[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(4): 891-899.