

网络出版时间:2019-06-12 09:41

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.12.009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190612.0939.018.html>

种植模式对核桃幼林土壤微团聚体组成与分形维数的影响

伍家辉,罗永飞,龚伟,王景燕,杨文龙,唐海龙,李灵聪,周楷玲,刘江丽

(四川农业大学 林学院 林业生态工程四川省重点实验室,四川 成都 611130)

【摘要】【目的】筛选核桃林下适宜的复合种植模式,并分析其对培肥土壤和提高林地经济效益的影响。【方法】在四川省雅安市大渡河干热河谷区,于核桃林下设置了 4 种植模式,即核桃+甘蓝+甘蓝(HGG)、核桃+甘蓝+马铃薯(HGM)、核桃+白菜+大豆(HBD)、核桃纯林(HCK),并以农地(玉米+马铃薯,NCK)为对照,测定不同种植模式林下土壤的微团聚体组成和分形维数(D)、物理性质、养分含量和微生物数量,并探讨 D 和特征微团聚体组成比例(PCM)、微团聚体各粒级含量及土壤理化性质、微生物数量的关系。【结果】与 NCK 相比,4 种复合种植模式林下土壤中的粒径 $>0.25\text{ mm}$ 土壤微团聚体含量均显著增加,粒径 $<0.02\text{ mm}$ 土壤微团聚体含量显著降低;不同种植模式林下土壤的 D 和 PCM 值由大到小依次表现为 $\text{NCK} > \text{HCK} > \text{HBD} > \text{HGM} > \text{HGG}$ 。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD、HCK 种植模式的土壤自然含水量及非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度分别增加 $12.2\% \sim 50.4\%$, $2.4\% \sim 14.8\%$, $2.8\% \sim 29.1\%$ 和 $2.6\% \sim 23.1\%$,体积质量降低 $4.6\% \sim 17.6\%$;有机质、全氮和碱解氮含量分别增加 $5.1\% \sim 14.9\%$, $3.9\% \sim 12.5\%$ 和 $25.1\% \sim 112.5\%$;细菌、放线菌、真菌和总微生物数量分别增加 $21.4\% \sim 54.3\%$, $19.2\% \sim 58.1\%$, $17.8\% \sim 58.4\%$ 和 $21.2\% \sim 54.6\%$ 。相关分析表明, D 和 PCM 值与土壤自然含水量、孔隙度、养分含量和微生物数量均呈极显著负相关,与体积质量呈极显著正相关。【结论】大渡河干热河谷区采用“核桃+甘蓝+甘蓝”种植模式,能有效改善核桃幼林林下土壤微团聚体组成,降低土壤 D 和 PCM,提高土壤养分含量和微生物数量,是该地区最佳的核桃林下复合种植模式。

【关键词】 核桃幼林;种植模式;林地效益;土壤微团聚体;土壤分形维数

【中图分类号】 S714.8;S664.104⁺.6 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2019)12-0069-08

Effects of different planting patterns on composition and fractal dimension of soil micro-aggregates in young walnut forest

WU Jiahui, LUO Yongfei, GONG Wei, WANG Jingyan, YANG Wenlong,
TANG Hailong, LI Lingcong, ZHOU Kailing, LIU Jiangli

(Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: 【Objective】Suitable planting patterns under walnut forests were selected to fertilize soil and improve the economic benefits of forest land. 【Method】Under different compound planting patterns including walnut+cabbage+cabbage (HGG), walnut+cabbage+potato (HGM), walnut+Chinese cabbage+soybean (HBD), walnut forest (HCK) and farmland control (corn+cabbage, NCK), soil microaggregates

【收稿日期】 2018-11-02

【基金项目】 四川农业大学新农村发展研究院雅安服务总站科技计划项目(2017-05);四川省科技厅项目(2016NYZ0035, 2017-NFP0051, 2017NFP0126)

【作者简介】 伍家辉(1996—),女,四川乐山人,在读硕士,主要从事经济林培育研究。E-mail:wujia2018hui@163.com

【通信作者】 王景燕(1980—),女,四川眉山人,副教授,博士,主要从事森林培育及水肥管理研究。

E-mail:wangjingyan@sicau.edu.cn

composition, fractal dimension (D), physical properties, nutrient contents and microbial number were determined in dry-hot valley of Dadu River in Ya'an, Sichuan. The relationships between fractal dimension (D) with composition of characteristic soil microaggregates (PCM), particle contents of microaggregates, physicochemical properties and microbial number were explored. 【Result】 Compared with NCK, the contents of soil microaggregates with size of >0.25 mm in the four planting patterns increased and the contents of soil microaggregates with size of <0.02 mm decreased. D and PCM values were in the order of $NCK > HCK > HBD > HGM > HGG$. Compared with NCK, natural water content, noncapillary porosity, capillary porosity, and total porosity of soil in four planting patterns were increased by 12.2%–50.4%, 2.4%–14.8%, 2.8%–29.1% and 2.6%–23.1%, respectively. The bulk density was decreased by 4.6%–17.6%, while organic matter, total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen contents were increased by 5.1%–14.9%, 3.9%–12.5% and 25.1%–112.5%, respectively. Bacteria, actinomycetes, fungus and total microorganism counts were increased by 21.4%–54.3%, 19.2%–58.1%, 17.8%–58.4% and 21.2%–54.6%, respectively. D and PCM values had significantly negative correlation with natural water content, porosity, nutrient content and microbial number, while they had significantly positive correlation with soil bulk density. 【Conclusion】 The development of walnut+cabbage+cabbage planting in the dry-hot valley of Dadu River can effectively improve soil microaggregate composition, reduce D and PCM values, and increase contents of soil nutrients and microorganisms. It is the best compound planting pattern under walnut forest in dry-hot valley of Dadu river.

Key words: young walnut forest; planting pattern; economic benefits of forest land; soil microaggregates; soil fractal dimension

微团聚体由土壤原生颗粒多次聚合胶结形成^[1],同一粒级微团聚体成分和性质基本相似,不同粒级微团聚体在土壤理化及生物学性质方面则有明显差别^[2],不同粒级微团聚体在土体内的组成比例及排列状况对土壤水、肥、气、热具有重要的调控功能^[3-5]。土壤不是由单一土粒组成,而是各级土粒及孔隙在各种因素综合作用下形成的大小、形状不同且具有分形特征的系统^[6-7]。分形理论已广泛应用于土壤特性的研究,已有研究表明,土壤微团聚体分形维数与土壤物理性质、养分含量及微生物数量关系密切^[4-8]。因此土壤分形维数可作为量化描述土壤肥力状况的指标,对于土壤肥力评价具有重要意义。

农林复合系统是一个在时间和空间上可充分开发潜在生态位的立体复合种植系统^[9],在提高光、热、水、肥和土地等资源利用率方面具有独特功能^[10],被广泛认为是一种可持续的土地利用方式,能有效提高土壤质量,实现农业的可持续生产^[11]。发展核桃林下种植可以充分挖掘生物资源,缓解农林争地矛盾,最大限度地提高土地资源利用率,增加核桃林地经济产出。同时,发展核桃林下种植可增加土壤有机质、疏松土壤,从而促进核桃生长^[9-11]。目前,有关不同林分或植被类型及不同地区土壤类

型、土地利用方式的土壤微团聚体组成及分形维数方面的研究报道较多,但有关林下种植模式对土壤微团聚体组成及分形特征方面的研究报道较少。因此,本研究以大渡河干热河谷区核桃林下种植模式为对象,研究不同种植模式对核桃林下土壤微团聚体组成及分形维数、理化性质、养分含量和微生物数量的影响,并分析了以上指标之间的相互关系,旨在为核桃林下复合种植模式的筛选和土壤培肥改土提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地位于四川省雅安市石棉县擦罗彝族乡晏如村($102^{\circ}33'E$, $29^{\circ}15'N$),该区属于中纬度亚热带季风气候为基带的山地气候,冬春干旱,夏秋多雨,干湿季明显。该区年平均气温 $17.1^{\circ}C$,年平均降水量 777.4 mm,年蒸发量 1 573 mm,年日照时数 1 245.6 h,无霜期平均 326 d。最热月 8 月的平均气温为 $24.7^{\circ}C$,最冷月 1 月的平均气温为 $8^{\circ}C$ 。试验地海拔 1 750~1 890 m,坡度 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。核桃造林时间为 2011 年秋季,株行距为 $4\text{ m}\times 5\text{ m}$,从 2012 年开始复合经营模式,一年种植两季农作物。核桃林下种植模式设核桃+甘蓝+甘蓝(HGG)、核桃+

甘蓝+马铃薯(HGM)、核桃+白菜+大豆(HBD)、核桃纯林(HCK,核桃林下不种植任何作物)共 4 个处理,以玉米+马铃薯(NCK)的农地种植模式为对照。试验地土壤为山地黄壤,试验前表层土壤(0~20 cm)基本理化性质为:pH 5.47,有机质 37.8 g/kg,全氮 2.1 g/kg,碱解氮 132.8 mg/kg,有效磷 22.0 mg/kg,速效钾 98.5 mg/kg。各季蔬菜或农作物所需肥料于当季栽种前一次性均匀施入,其中氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)的施用总量分别为 150,60 和 150 kg/hm²。

1.2 研究方法

于 2017 年 12 月上旬在每种种植模式中各设置 3 个 10 m×10 m 的标准地,采用蛇形 5 点取样法分别采集 0~20 cm 土层土样并混匀,带回实验室后将每种样品分为两份,其中一份自然风干,用于测定土壤微团聚体组成和养分含量;另一份新鲜土样用于测定土壤微生物数量。同时用环刀法采集原状土样用于土壤物理性质测定。

土壤微团聚体组成采用吸管法测定,有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,全氮含量采用半微量凯式定氮法测定,碱解氮含量采用碱解-扩散法测定,有效磷含量采用 Olsen 法测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[12-13];土壤物理性质(包括自然含水量、体积质量、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)采用环刀法^[13]测定;土壤可培养微生物(细菌、真菌和放线菌)数量采用稀释平板法^[14]测定。特征微团聚体组成比例(PCM)采用微团聚体组成中粒径<0.02 mm 土壤微团聚体与粒径≥0.02 mm 土壤微团聚体含量的比值计算。土壤分形维数(D)参考杨培岭等^[15]的方法,计算公式为:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{(3-D)} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}。$$

表 1 不同种植模式核桃幼林林下土壤微团聚体组成

Table 1 Composition of soil microaggregates in different planting patterns under walnut forests

种植模式 Planting pattern	不同粒径土壤微团聚体含量/% Contents of soil microaggregates with different particle sizes					特征微团聚 体组成比例 (PCM)	分形维数(D) Fractal dimension	相关系数(R) Correlation coefficient
	2~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm			
HGG	66.940±1.479 a	9.195±0.626 c	13.540±1.154 b	6.494±0.499 d	3.831±0.214 d	0.115±0.006 d	2.539±0.010 d	0.994±0.003 **
HGM	61.533±1.967 b	11.189±0.732 b	14.726±1.019 b	7.518±0.748 cd	5.033±0.371 c	0.144±0.012 c	2.575±0.011 c	0.995±0.001 **
HBD	58.228±1.096 c	10.507±0.761 bc	16.954±1.480 a	8.419±0.592 c	5.893±0.377 b	0.167±0.013 c	2.598±0.013 b	0.994±0.003 **
HCK	53.526±1.576 d	14.407±1.094 a	13.852±0.650 b	10.021±0.651 b	8.194±0.246 a	0.223±0.010 b	2.644±0.003 a	0.998±0.002 **
NCK	51.274±1.560 d	15.237±0.755 a	13.202±0.390 b	11.438±0.752 a	8.849±0.740 a	0.255±0.020 a	2.656±0.012 a	0.998±0.002 **

注:1. 同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

2. * * 表示相关性达极显著水平(P<0.01)。下同。

Note:1. Different lowercase letters significant difference(P<0.05).

2. * * indicates significant correlation (P<0.01). The same below.

两边分别取对数得:

$$(3-D)\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)=\lg\left[\frac{W(\delta<\bar{d}_i)}{W_0}\right]。$$

式中: $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒径土壤微团聚体的平均直径, $W(\delta<\bar{d}_i)$ 为粒径小于平均粒径($\bar{d}_i$)的土壤微团聚体含量, W_0 为土壤微团聚体总含量。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 软件对试验数据进行统计与分析,数据均以“平均值±标准差”表示,采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著极差法(SSR)进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式核桃幼林林下土壤微团聚体组成与分形维数

由表 1 可知,各种种植模式中,粒径 2~0.25,0.25~0.05,0.05~0.02,0.02~0.002 和<0.002 mm 土壤微团聚体的含量分别为 51.274%~66.940%,9.195%~15.237%,13.202%~16.954%,6.494%~11.438%和 3.831%~8.849%。由此可见,各种种植模式下的土壤微团聚体组成中,粒径 2~0.25 mm 土壤微团聚体含量最高,粒径<0.002 mm 的土壤微团聚体含量最低。除 HCK 外,其余种植模式粒径 2~0.25 和 0.25~0.05 mm 土壤微团聚体含量均与 NCK 差异显著;除 HBD 外,其余种植模式粒径 0.05~0.02 mm 土壤微团聚体含量均与 NCK 差异不显著;各种种植模式粒径 0.02~0.002 mm 土壤微团聚体含量均与 NCK 差异显著;除 HCK 外,其余种植模式粒径<0.002 mm 的土壤微团聚体含量均与 NCK 差异显著。这说明发展核桃林下种植有利于改善土壤微团聚体组成。

由表 1 可知,不同种植模式下核桃幼林林下土壤微团聚体的分形维数(D)为 2.539~2.656,除 HCK 处理,其余种植模式的 D 值均与 NCK 差异显著;各模式的特征微团聚体组成比例(PCM)为 0.115~0.255,且各种植模式均与 NCK 差异显著。 D 和 PCM 值大小排序均表现为 HGG<HGM<HBD<HCK<NCK,与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 的 D 值分别降低 4.4%,3.0%,2.2%和 0.5%,PCM 值分别降低 54.9%,43.5%,34.5%

表 2 不同种植模式核桃幼林土壤微团聚体分形维数和特征微团聚体组成比例与各粒径团聚体含量(X)的相关关系

粒径/mm Particle size	拟合回归方程 Regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	D	PCM	D	PCM
2~0.25	$Y=-0.007\ 1X+3.020\ 5$	$Y=-0.008\ 5X+0.677\ 2$	-0.941**	-0.963**
0.25~0.05	$Y=0.016\ 1X+2.409\ 3$	$Y=0.019\ 6X-0.056\ 8$	0.876**	0.914**
0.05~0.02	$Y=-0.006\ 6X+2.700\ 6$	$Y=-0.009\ 4X+0.316\ 9$	-0.169	-0.206
0.02~0.002	$Y=0.022\ 8X+2.457\ 9$	$Y=0.026\ 4X+0.011\ 3$	0.992**	0.984**
<0.002	$Y=0.02\ 3X+2.332\ 9$	$Y=0.027\ 8X-0.147\ 6$	0.869**	0.863**

2.2 不同种植模式对核桃幼林土壤物理性质的影响

由表 3 可知,不同种植模式对核桃林下土壤自然含水量、体积质量和孔隙度均有明显影响。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 处理的土壤自然含水量分别增加 50.4%,40.3%,33.8%和 12.2%,除了 HCK 之外,其余种植模式均显著高于 NCK。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 的体积质量分别降低 17.6%,12.5%,9.3%和 4.6%,除了 HCK 之外,其余种植模式均与 NCK 差异显著。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK

和 12.5%。这说明发展核桃林下种植有利于降低 D 和 PCM,可以改善土壤结构稳定性。

由表 2 可知, D 值与粒径 0.25~0.05,0.02~0.002和<0.002 mm 土壤微团聚体含量呈极显著正相关,与粒径 2~0.25 mm 土壤微团聚体含量呈极显著负相关,与粒径 0.05~0.02 mm 土壤微团聚体含量相关性不显著。说明微团聚体组成中粒径 2~0.25,0.25~0.05,0.02~0.002 和<0.002 mm 的土壤微团聚体含量对 D 值具有重要影响。

的非毛管孔隙分别增加 14.8%,11.2%,7.0%和 2.4%,除 HGG 外,其余种植模式均与 NCK 差异不显著。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 的毛管孔隙度分别增加 29.1%,17.6%,8.2%和 2.8%,除 HGG 和 HGM 外,其余种植模式均与 NCK 差异不显著。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 的总孔隙度分别增加 23.1%,14.9%,7.7%和 2.6%,除 HGG 和 HGM 外,其余种植模式与 NCK 差异均不显著。这说明发展核桃林下种植有利于降低土壤体积质量、增加孔隙度和自然含水量。

表 3 不同种植模式核桃幼林的土壤水分含量和物理性质

模式 Planting pattern	自然含水量/% Soil water content	体积质量/(g·cm ⁻³) Bulk density	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity
HGG	19.047±0.842 a	1.064±0.050 c	24.525±1.604 a	38.649±1.557 a	63.174±3.124 a
HGM	17.765±1.559 a	1.130±0.065 bc	23.766±1.823 ab	35.192±1.260 b	58.958±2.865 ab
HBD	16.937±0.821 a	1.172±0.057 bc	22.868±1.274 ab	32.399±1.488 c	55.267±2.730 bc
HCK	14.205±1.071 b	1.233±0.076 ab	21.891±0.807 b	30.765±1.439 c	52.656±2.236 c
NCK	12.663±0.759 b	1.292±0.061 a	21.370±0.972 b	29.931±1.491 c	51.301±2.219 c

2.3 不同种植模式对核桃幼林林下土壤养分含量的影响

由表 4 可知,种植模式对核桃幼林土壤有机质和养分含量影响显著。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 处理的土壤有机质含量分别增加 14.9%,12.3%,9.9%和 5.1%,土壤全氮含量分别增加 12.5%,10.4%,8.1%和 3.9%,除 HGG 和 HGM 外,其余种植模式土壤有机质和全氮含量均

与 NCK 差异不显著。与 NCK 相比,HGG、HGM、HBD 和 HCK 土壤碱解氮含量分别增加 112.5%,99.8%,71.5%和 25.1%,各种植模式均显著高于 NCK。与 NCK 相比,HGG 和 HGM 的土壤有效磷含量分别增加 21.9%和 5.0%,HBD 和 HCK 的土壤有效磷含量分别降低 6.2%和 28.3%,NCK 显著高于 HCK,但显著低于 HGG,而与 HGM 和 HBD 差异不显著。与 NCK 相比,HGG、HGM 和 HBD

的土壤速效钾含量分别增加 53. 0%, 28. 8% 和 20. 4%, HCK 的土壤有效钾含量降低了 17. 4%, 除

HCK 外, 其余种植模式均显著高于 NCK。这说明发展核桃林下种植总体有利于土壤养分含量的提高。

表 4 不同种植模式核桃幼林土壤养分含量的变化

Table 4 Soil nutrient contents in different planting patterns under walnut forests					
种植模式 Planting pattern	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	全氮/(g·kg ⁻¹) Total N	碱解氮/(g·kg ⁻¹) Hydrolysis N	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available P	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K
HGG	43. 838±2. 340 a	2. 449±0. 107 a	294. 3±13. 9 a	35. 05±1. 55 a	158. 0±6. 7 a
HGM	42. 844±2. 036 a	2. 403±0. 127 a	276. 7±12. 8 a	30. 20±1. 45 b	133. 1±7. 1 b
HBD	41. 936±2. 162 ab	2. 353±0. 105 ab	237. 5±7. 4 b	26. 98±1. 17 c	124. 4±6. 2 b
HCK	40. 089±1. 982 ab	2. 261±0. 098 ab	173. 3±5. 7 c	20. 62±0. 93 d	85. 3±2. 6 d
NCK	38. 156±1. 652 b	2. 176±0. 097 b	138. 5±5. 4 d	28. 75±1. 36 bc	103. 3±4. 8 c

2. 4 不同种植模式对核桃幼林土壤微生物数量的影响

由表 5 可知, 种植模式对土壤微生物数量影响显著。与 NCK 相比, HGG、HGM、HBD 和 HCK 处理土壤细菌数量分别增加 54. 3%, 47. 0%, 33. 4% 和 21. 4%, 土壤放线菌数量分别增加

58. 1%, 48. 1%, 41. 0% 和 19. 2%, 土壤真菌数量分别增加 58. 4%, 45. 3%, 42. 6% 和 17. 8%, 土壤总微生物数量分别增加 54. 6%, 47. 1%, 34. 0% 和 21. 2%, 以上指标中, 各种植模式均与 NCK 差异显著。这说明发展核桃林下种植有利于促进土壤微生物生长及数量的增加。

表 5 不同种植模式核桃幼林的土壤微生物数量及组成

Table 5 Soil microbial number and composition in different planting patterns under walnut forests				
种植模式 Planting pattern	细菌/(×10 ⁶ CFU·g ⁻¹) Bacteria	放线菌/(×10 ⁵ CFU·g ⁻¹) Actinomycete	真菌/(×10 ⁴ CFU·g ⁻¹) Fungus	总微生物/(×10 ⁶ CFU·g ⁻¹) Total microorganism
HGG	14. 923±0. 972 a	11. 636±0. 561 a	4. 721±0. 228 a	16. 134±1. 025 a
HGM	14. 212±0. 886 ab	10. 896±0. 641 ab	4. 332±0. 301 ab	15. 345±0. 855 ab
HBD	12. 901±0. 844 bc	10. 374±0. 625 b	4. 251±0. 275 b	13. 981±0. 817 bc
HCK	11. 734±0. 663 c	8. 771±0. 540 c	3. 512±0. 136 c	12. 646±0. 611 c
NCK	9. 669±0. 708 d	7. 359±0. 638 d	2. 981±0. 118 d	10. 435±0. 772 d

2. 5 土壤 D 和 PCM 与土壤理化指标的相关性

由表 6 可知, D 和 PCM 与土壤体积质量呈极显著正相关, 与土壤自然含水量、孔隙度(非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度)、养分(有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾)含量及微生物(细菌、真

菌、放线菌和总微生物)数量均呈极显著负相关。说明 D 和 PCM 的大小可以很好地表征种植模式对核桃林下土壤松紧度、孔隙状况和养分含量及微生物数量等的影响。

表 6 不同种植模式核桃幼林的土壤分形维数和特征微团聚体组成比例与土壤理化性质和微生物数量的关系

Table 6 Relationships between soil fractal dimension and composition of characteristic soil microaggregates, soil physicochemical properties and microbial number in different planting patterns under walnut forests				
指标 Index	拟合回归方程 Regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	D	PCM	D	PCM
自然含水量 Soil water content	Y=-0. 016 3 X+2. 866 9	Y=-0. 019 3 X+0. 492 4	-0. 863 **	-0. 878 **
体积质量 Bulk density	Y=0. 349 9 X+2. 193 8	Y=0. 416 5 X-0. 308 1	0. 752 **	0. 768 **
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	Y=-0. 019 3 X+3. 046	Y=-0. 021 1 X+0. 664 0	-0. 715 **	-0. 671 **
毛管孔隙度 Capillary porosity	Y=-0. 011 8 X+2. 994 9	Y=-0. 012 9 X+0. 610 7	-0. 917 **	-0. 865 **
总孔隙度 Total porosity	Y=-0. 007 9 X+3. 049	Y=-0. 008 7 X+0. 669 5	-0. 881 **	-0. 830 **
有机质 Organic matter	Y=-0. 011 6 X+3. 084 3	Y=-0. 014 0 X+0. 759 7	-0. 701 **	-0. 725 **
全氮 Total N	Y=-0. 000 7 X+2. 759 8	Y=-0. 293 0 X+0. 863 4	-0. 742 **	-0. 776 **
碱解氮 Hydrolysis N	Y=-0. 000 7 X+2. 759 8	Y=-0. 000 8 X+0. 365 7	-0. 947 **	-0. 967 **
有效磷 Available P	Y=-0. 006 3 X+2. 779 7	Y=-0. 006 2 X+0. 354 5	-0. 717 **	-0. 608 **
速效钾 Available K	Y=-0. 001 5 X+2. 782 2	Y=-0. 001 6 X+0. 371 1	-0. 908 **	-0. 833 **
细菌 Bacteria	Y=-0. 019 2 X+2. 849 4	Y=-0. 023 3 X+0. 478 7	-0. 853 **	-0. 890 **
放线菌 Actinomycete	Y=-0. 025 0 X+2. 852 8	Y=-0. 030 3 X+0. 482 0	-0. 903 **	-0. 939 **
真菌 Fungus	Y=-0. 062 5 X+2. 851 9	Y=-0. 073 7 X+0. 472 8	-0. 912 **	-0. 923 **
总微生物 Total microorganism	Y=-0. 018 1 X+2. 854	Y=-0. 022 0 X+0. 484 1	-0. 864 **	-0. 901 **

3 讨 论

据报道,土地利用方式和林分类型会影响土壤中的有机无机胶体含量,不同粒径土壤单粒通过胶结物质粘聚成微团聚体,胶结物质含量会显著影响土壤中各粒径微团聚体的组成比例^[8]。如代文才等^[7]研究发现,在 0~20 cm 土层中,粒径 1~0.25 mm 微团聚体含量表现为林地>旱地,粒径<0.01 mm 微团聚体含量表现为旱地>林地;甘凤玲等^[16]研究发现,震区不同植被恢复模式下的微团聚体组成中,粒径 1~0.25 mm 土壤微团聚体含量是优势粒级,且表现为经果林>玉米;龚伟等^[8]研究发现,长期施用化肥或有机肥均使大粒径(2~0.25 mm)土壤微团聚体含量增加,小粒径(<0.02 mm)土壤微团聚体含量减少。本研究结果与代文才等^[7]、甘凤玲等^[16]及龚伟等^[8]的研究结果相似,微团聚体组成中大粒径(2~0.25 mm)土壤微团聚体含量增加,而小粒径(<0.02 mm)土壤微团聚体含量降低。本研究的核桃林下各种种植模式中,每年大量的核桃枯落物及林下种植采收残余物归还土壤后增加了土壤有机质和胶体含量,同时核桃林和作物根系的分泌物及其死亡分解后形成的腐殖质也会增强土壤颗粒间的胶结作用,能有效促进土粒团聚形成大粒级微团聚体^[17];另外,核桃树的根系生物量较大,固土效果好,树冠、林下植物及地表枯落物形成了较好的空间性土壤保护格局,有效减少了降雨时的土壤溅蚀^[18],进而也促进了土壤团聚,减免了团聚体的破坏和分散。这可能是核桃林下复合种植模式优于核桃纯林,核桃纯林又优于农地的主要原因。

土壤体积质量可反映土壤通气性、持水性及结构等物理性质^[19],土壤孔隙度的增加导致体积质量降低;土壤体积质量小,则土壤颗粒排列疏松,孔隙度大,表明土壤保水通气性良好^[20-21]。本研究发现,与农地相比,各种种植模式核桃幼林土壤的自然含水量、毛管孔隙、非毛管孔隙及总孔隙增加,体积质量降低。这可能与核桃树庞大根系对土壤有穿插作用有关,也与核桃林土壤有机质的增加促进了土壤动物的活动从而使土壤疏松多孔有直接关系。土壤中营养元素含量的高低显著影响植物的生长发育,土壤养分含量是表征土壤肥力的重要指标^[22]。赵斯等^[23]研究发现,与农地相比,农林复合生态系统可以明显提高土壤养分含量,改善土壤结构;陈春峰等^[24]研究发现,与纯林相比,橡胶林农林复合系统能显著增加土壤孔隙度,降低土壤体积质量,明显改

善土壤质量。郭颖等^[25]研究发现,与核桃清耕模式相比,核桃复合经营模式提高了土壤中的有机质和养分含量,有效改善了核桃园的土壤肥力;Dollinger 等^[10]研究发现,相比于单作系统,农林复合系统可以提高土壤养分有效性和土壤肥力,并增强土壤微生物的活力。本研究表明,与农地相比,核桃+甘蓝+甘蓝和核桃+甘蓝+马铃薯种植模式的土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均明显增加,核桃纯林的土壤有机质、全氮和碱解氮含量也有所增加,这与核桃林及其林下植物的枯落物和残余物及根系归还土壤有关;而核桃纯林土壤有效磷和速效钾含量低于农地,可能与农地施肥量较高有关^[26]。本研究还发现,各复合种植模式核桃林土壤的微生物数量均高于核桃纯林和农地。土壤微生物参与土壤中有有机质的矿质化及腐殖化过程,矿质化及腐殖化过程又为土壤微生物活动提供了养分和能量,土壤微生物与有机质转化过程的相互作用改善了土壤养分的有效性及含量^[27]。与农地相比,各种种植模式土壤有机质含量的增加,刺激了土壤微生物的增长,进而促进了微生物数量的增加和土壤肥力的改善。

D 和 PCM 可以在一定程度上反映土壤物理性状和肥力特征^[5,28],并揭示其变化的规律性。蒲玉琳等^[29]研究发现,植物篱-农作模式下坡耕地土壤的 D 随土壤体积质量增大而降低,随孔隙度、有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量的增加而增大;唐海龙等^[30]研究发现,青花椒林地 D 和 PCM 与土壤养分含量和微生物数量呈显著或极显著负相关;舒正悦等^[4]研究发现,柑橘林下养鸡后,土壤 D 和 PCM 均与土壤含水量、孔隙度和养分含量呈显著负相关。本研究发现, D 和 PCM 与土壤物理性质(除体积质量外)、养分含量和微生物数量均呈极显著负相关,而与体积质量呈极显著正相关。这与蒲玉琳等^[29]的研究结果相反,而与唐海龙等^[30]和舒正悦等^[4]的研究结果相同。土壤孔隙度是评价土壤结构的主要指标^[31], D 与结构稳定性关系紧密^[17],核桃林下土壤孔隙度及养分含量越高,则 D 值越小,土壤结构稳定性越好。钟羨芳等^[32]研究发现,不同植被下土壤的 D 与粒径 0.02~2 mm 土壤微团聚体含量呈极显著负相关,与粒径<0.02 mm 土壤微团聚体含量呈极显著正相关;孙彩丽等^[33]研究发现,黄土区不同施肥处理下土壤 D 与粒径<0.02 mm 土壤微团聚体含量呈极显著正相关,与粒径>0.02 mm 土壤微团聚体含量呈极显著负相关。本研究发现,与农

地相比,各核桃幼林林下复合种植模式中,大粒径($>0.25\text{ mm}$)土壤微团聚体含量增加,而小粒径($<0.02\text{ mm}$)土壤微团聚体含量降低, D 和 PCM 均与大粒径($2\sim 0.25\text{ mm}$)土壤微团聚体含量呈极显著负相关,与小粒径土壤微团聚体含量呈极显著正相关,这与钟羨芳等^[32]和孙彩丽等^[33]的研究结果相似。因此,复合种植模式核桃林土壤的 D 和 PCM 对评价不同种植模式的土壤培肥改土作用具有较好的表征作用。

4 结 论

核桃幼林下的农林复合种植模式能较好地促进土壤微团聚体组成中大粒径($2\sim 0.25\text{ mm}$)土壤微团聚体的增加及小粒径($<0.02\text{ mm}$)土壤微团聚体的减少,改善土壤物理性质,增加土壤养分含量和微生物数量。本研究条件下,不同种植模式核桃幼林林下土壤的 D 和 PCM 值大小排序为核桃+甘蓝+甘蓝 $<$ 核桃+甘蓝+马铃薯 $<$ 核桃+白菜+大豆 $<$ 核桃纯林 $<$ 玉米+马铃薯,表明核桃+甘蓝+甘蓝种植模式是该地区核桃幼林林下最优的复合种植模式。 D 和 PCM 与土壤物理性质、养分含量和微生物数量具有较好的相关性,可作为核桃幼林复合种植模式下土壤肥力综合评价的定量化描述指标。

[参考文献]

- [1] 龚伟,胡庭兴,王景燕,等.川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究[J].土壤学报,2007,44(3):571-575.
- Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Fractal features of soil microaggregates in soils under natural and regenerated evergreen broadleaved forests in South Sichuan Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 571-575.
- [2] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J].土壤学报,1994,31(1):18-25.
- Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositions proportion in judging fertility level [J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 18-25.
- [3] Ahmadi A, Neyshabouri M, Asadi H R A H. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility [J]. Journal of Hydrology, 2011, 400(3): 305-311.
- [4] 舒正悦,王景燕,龚伟,等.复合养殖对柑橘林土壤微团聚体分形特征及理化性质的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(5):92-98.
- Shu Z Y, Wang J Y, Gong W, et al. Effects of compound management in citrus orchard on soil micro-aggregate fractal features and soil physical and chemical properties [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(5): 92-98.
- [5] 王晟强,郑子成,李廷轩.四川茶园土壤微团聚体组成及其分形特征[J].林业科学,2014,50(9):10-17.
- Wang S Q, Zheng Z C, Li T X. Composition and fractal features of soil micro-aggregates in camellia sinensis plantations, Sichuan Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(9): 10-17.
- [6] Denef K A J, Six A B. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(6): 774-786.
- [7] 代文才,高明,王子芳,等.紫色丘陵区不同土地利用方式土壤剖面微团聚体组成及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):259-264.
- Dai W C, Gao M, Wang Z F, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregates under different land-use types in purple hilly area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 259-264.
- [8] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等.长期施肥对小麦-玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响[J].土壤学报,2011,48(6):1141-1148.
- Gong W, Yan X Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on composition and fractal feature of soil microaggregates under a wheat-maize cropping system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1141-1148.
- [9] 李岩泉,何春霞.我国农林复合系统自然资源利用率研究进展[J].林业科学,2014,50(8):141-145.
- Li Y Q, He C X. Research progress of natural resource utilization in agroforestry system in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(8): 141-145.
- [10] Dollinger J, Jose S. Agroforestry for soil health [J]. Agroforestry Systems, 2018, 92(2): 213-219.
- [11] Li T, He B H S E, Zhang Y, et al. Fractal analysis of soil physical and chemical properties in five tree-cropping systems in southwestern China [J]. Agroforestry Systems, 2016, 92(3): 457-468.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:638.
- Lu R K. Methods of soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 638.
- [13] 中国标准出版社.中国林业标准汇编[M].北京:中国标准出版社,1998.
- China Standards Press. Compilation of forestry standards in China [M]. Beijing: China Standards Press, 1998.
- [14] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986:314.
- Xu G H, Zheng H Y. Handbook of soil microbial analysis methods [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 314.
- [15] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristic of soil

- characterized by the weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [16] 甘凤玲, 王 涛, 何丙辉, 等. 汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 84-91.
Gan F L, Wang T, He B H, et al. Fractal feature of soil in the different types of vegetation in Wenchuan earthquake zone [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 84-91.
- [17] 张海廷, 时延庆. 山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 126-131.
Zhang H T, Shi Y Q. Soil particle-sized distribution and fractal dimension different land use type in Shandong Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 126-131.
- [18] 闫建梅, 何联君, 何丙辉, 等. 川中丘陵区不同治理模式对土壤微团聚体分形特征的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(11): 1294-1300.
Yan J M, He L J, He B H, et al. Effects of different governance patterns of small watershed on fractal features of soil micro-aggregates in the hilly areas of central Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(11): 1294-1300.
- [19] 李 梅, 张学雷. 不同土体构型的土壤肥力评价及与容重关系分析 [J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1420-1427.
Li M, Zhang X L. Evaluation of soil fertility and its relationship with soil bulk density in different soil profile texture patterns [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(6): 1420-1427.
- [20] Pini R, Paris P, Guidi G V, et al. Soil physical characteristics and understory management in a walnut (*Juglans regia* L.) plantation in central Italy [J]. Agroforestry Systems, 1999, 46(1): 95-105.
- [21] 张贝贝, 田 毅. 高、低产田土壤物理性质研究 [J]. 湖北农业科学, 2017, 56(15): 2832-2834.
Zhang B B, Tian Y. Study on soil physical properties of high and low yield field [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(15): 2832-2834.
- [22] 丁 卉, 李朋飞, 孙维红, 等. 不同种植模式对茶花生长及土壤理化性质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 106-110.
Ding H, Li P F, Sun W H, et al. Effects of different planting patterns on *Camellia* growth and soil physical and chemical properties [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 106-110.
- [23] 赵 斯, 赵雨森, 王 林, 等. 东北黑土区农林复合土壤效应 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 68-70.
Zhao S, Zhao Y S, Wang L, et al. Complex effect of agroforestry in black soil region of northeast China [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(5): 68-70.
- [24] 陈春峰, 刘文杰, 吴骏恩, 等. 西双版纳橡胶农林复合系统土壤团聚体稳定性研究 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(1): 49-56.
Chen C F, Liu W J, Wu J E, et al. Water-stable aggregation of soil in different types of rubber-based agroforestry ecosystems in Xishuangbanna [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(1): 49-56.
- [25] 郭 颖, 聂朝俊, 向仰州, 等. 不同核桃农林复合经营模式对土壤肥力的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 391-397.
Guo Y, Nie C J, Xiang Y Z, et al. Effect of different agroforestry patterns on soil fertility in *Juglans regia* orchards [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(2): 391-397.
- [26] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区不同利用方式的土壤养分特征研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 75-78.
Hu Y F, Deng L J, Zhang S R, et al. Study on nutrient characteristics of soils under different land utilization types in middle part of Sichuan Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 75-78.
- [27] Tian J, Lou Y, Gao Y, et al. Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(5): 523-532.
- [28] Xia D, Deng Y, Wang S, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China [J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 455-478.
- [29] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 植物篱-农作坡耕地土壤微团聚体组成及分形特征 [J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1069-1077.
Pu Y L, Xie D T, Lin C W, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregates in sloping farmland with hedgerow [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1069-1077.
- [30] 唐海龙, 龚 伟, 王景燕, 等. 青花椒种植对土壤微团聚体分形维数和生化特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 1-8.
Tang H L, Gong W, Wang J Y, et al. Effects of planting *Zanthoxylum armatum* on fractal dimension and biochemical characteristics of soil micro-aggregates [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 1-8.
- [31] 孙向阳, 陈金林, 崔晓阳, 等. 土壤学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 360.
Sun X Y, Chen J L, Cui X Y, et al. Pedology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 360.
- [32] 钟羨芳, 陈 哲, 刘炜杰, 等. 福州江滨公园不同植被对土壤微团聚体组成及分形的影响 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(6): 96-102.
Zhong X F, Chen Z, Liu W J, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregates under different types of vegetation in urban park of Fuzhou [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2016, 32(6): 96-102.
- [33] 孙彩丽, 薛 蕙, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 550-561.
Sun C L, Xue S, Liu G B, et al. Effects of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 550-561.