

## 柑橘林下养鸡对土壤团粒结构分形特征的影响

蔡煜, 王景燕, 龚伟, 吕向楠, 舒正悦, 闫思宇, 赵昌平

(四川农业大学 林学院 水土保持与荒漠化防治四川省重点实验室, 四川 成都 611130)

**摘要:** 在四川盆地周低山丘陵区柑橘 *Citrus reticulata* 林下养鸡 *Gallus domesticus*, 研究不同养鸡密度(0, 600, 1 200 和 2 400 只·hm<sup>-2</sup>)对表层(0~20 cm)土壤团聚体组成、分形维数、理化性质、微生物数量和土壤酶活性的影响, 探讨分形维数与土壤理化性质、微生物数量及土壤酶活性的关系。结果表明: 林下养鸡使>0.25 mm 粒径团聚体(干筛)和>0.25 mm 粒径水稳性团聚体(湿筛)含量分别增加 1.9%~5.0%和 7.3%~24.5%, 且随养鸡密度的增加而增加。土壤分形维数为 2.174~2.760, 且分形维数随养鸡密度、>0.25 mm 粒径团聚体(干筛)和水稳性团聚体(湿筛)含量的增加而降低, 与>0.25 mm 和>5.00 mm 水稳性团聚体含量呈极显著相关( $P<0.01$ )。林下养鸡降低了土壤容重、改善了土壤孔隙, 增加了土壤养分、微生物数量和酶活性, 其土壤肥力的提高作用随养鸡密度的增加而增加, 且土壤理化性质、微生物数量和酶活性与分形维数间呈显著相关( $P<0.05$ )。说明柑橘林下养鸡能有效改善土壤团聚体组成和土壤肥力, 降低土壤团聚体和水稳性团聚体分形维数。表 5 参 35

**关键词:** 土壤学; 柑橘林; 林下养鸡; 团粒结构; 分形维数; 土壤肥力

**中图分类号:** S714.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2017)02-0225-08

## Raising chickens in citrus orchards on fractal features of soil aggregates

CAI Yu, WANG Jingyan, GONG Wei, LÜ Xiangnan, SHU Zhengyue, YAN Siyu, ZHAO Changping

(Sichuan Provincial Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Control, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract:** Raising chickens under trees or bushes could improve the soil. To research the influence of the surface layer's (0–20 cm) soil aggregate composition, fractal dimension, physical and chemical properties, microbial population, and enzyme activities for different chicken raising densities and to probe relationships between fractal dimension and soil physical and chemical properties, microbial population, and enzyme activities; citrus orchards in the Sichuan Basin low mountain hilly area were selected with four chicken density treatments (0, 600, 1 200, and 2 400 chickens per hm<sup>2</sup>) and each treatment had three replications; the 12 plots of 20 m×20 m each were arranged in a randomized block design. Soils in the surface layer (0–20 cm) in each plot were collected, by snake-shaped five-point sampling method, to determine soil properties, such as soil aggregate composition and fractal dimension. Results showed a significant ( $P<0.05$ ) increase of 1.9%–5.0% in content of the >0.25 mm particle-sized soil aggregates (dry-sieved) and 7.3%–24.5% in water-stable aggregates (wet-sieved) in citrus orchards that were raising chickens, with both increasing as chicken density increased. Soil fractal dimension ranged from 2.174 to 2.760 and significantly ( $P<0.05$ ) decreased as chicken density (by 1.3%–8.7%) and the >0.25 mm particle-sized soil aggregates (dry-sieved) and water-stable aggregates (wet-sieved) increased. Soil fractal dimension was significantly correlated with the content of >0.25 mm ( $r=-0.929$ ,  $P<0.05$ ) and >0.50 mm ( $r=-0.915$ ,  $P<0.05$ ) particle-sized water-stable aggregates (wet-sieved). Raising

收稿日期: 2016-04-01; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41201296, 41061140515); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室资助项目(0812201244)

作者简介: 蔡煜, 从事林业生态工程等研究。E-mail: 627200302@qq.com。通信作者: 龚伟, 教授, 博士, 从事土壤生态等研究。E-mail: gongwei@sicau.edu.cn

chickens in citrus orchards significantly ( $P < 0.05$ ) decreased soil bulk density (except 600 chickens per  $\text{hm}^2$ ), significantly ( $P < 0.05$ ) improved soil total porosity (except 600 chickens per  $\text{hm}^2$ ), and significantly ( $P < 0.05$ ) increased nutrient content, microbial population, and enzyme activities; soil fertility also increased as chicken density increased. Soil physical and chemical properties, microbial population, and enzyme activities were significantly ( $P < 0.05$ ) correlated with soil fractal dimension. These findings indicated that raising chickens in citrus orchards could improve soil aggregate composition and soil fertility with fractal dimension of the soil aggregate and water-stable aggregate decreasing; fractal dimension of soil aggregate could also be used as an important comprehensive quantitative index to evaluate soil physical and chemical properties when raising chickens in a forest ecosystem. [Ch, 5 tab. 35 ref.]

**Key words:** soil science; citrus orchard; free range chickens under trees and bushes; aggregate structure; fractal dimension; soil fertility

团粒结构及其稳定性是土壤质量的敏感性物理指标<sup>[1]</sup>, 能决定土壤物理性质和调节土壤肥力, 影响土壤通透性、孔隙性和持水性<sup>[2]</sup>。良好的团粒结构能起到协调养分的消耗和积累、稳定土壤温度、改善土壤肥力和利于植物根系伸展的作用<sup>[3]</sup>。改良土壤有多种方式, 林下养鸡 *Gallus domesticus* 是其中一种新兴的培肥改土方式。林下养鸡会增加鸡粪含量, 鸡粪是优质的有机肥料<sup>[4]</sup>, 鸡粪中含有丰富的有机物质、氮、磷、钾和其他植物必需养分, 能提高土壤养分含量<sup>[5]</sup>和促进培肥改土, 兼顾良好的经济效益和社会效益, 具有改良土壤、节省林地肥料、灭虫锄草和促进树木生长等优点<sup>[6-8]</sup>, 且有机肥有利于增加土壤团聚体含量、提高土壤团聚体稳定性和改善土壤结构<sup>[9-10]</sup>。土壤是具有分形特征的系统, 土壤团粒结构可以用分形维数来描述<sup>[11]</sup>。TURCOTTE<sup>[11]</sup>提出多孔介质材料的粒径分布与分形维数的关系公式; 杨培岭等<sup>[12]</sup>提出了用粒径的质量分布取代粒径的数量分布来描述土壤分形特征, 此法具有精确简便的优点, 应用更为广泛。分形维数可以客观反映土壤粒径大小<sup>[13]</sup>、结构性状<sup>[14]</sup>和理化性质<sup>[15-16]</sup>, 并能够量化描述土壤肥力状况<sup>[17]</sup>。目前, 有关林下养鸡的研究主要集中在养鸡密度管理和养鸡对土壤理化性质等的影响方面, 而有关林下养鸡对土壤分形特征影响方面的研究尚未见报道。本研究通过在四川盆地低山丘陵区柑橘林下养鸡, 研究不同养鸡密度对土壤团粒结构分形特征、理化性质和微生物数量及土壤酶活性的影响, 探讨分形维数与土壤理化性质、微生物数量及土壤酶活性的关系, 为构建林下养鸡复合经营模式和了解林下养鸡对林地土壤肥力的影响提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区自然概况

试验地位于四川省丹棱县红石村退耕还林示范区( $30^{\circ}03'N$ ,  $103^{\circ}29'E$ ), 海拔为 495 ~ 583 m。该区地处于四川盆地西南边缘, 属于亚热带湿润季风气候, 地带性植被为亚热带常绿阔叶林。根据丹棱县气象站(海拔 496.2 m)的历年气象观测资料统计, 全年日平均气温为  $16.6^{\circ}C$ , 最热月均温  $25.6^{\circ}C$ , 最冷月均温  $6.3^{\circ}C$ , 全年降水量为 1 232.8 mm, 年降水天数为 170.2 d, 降水集中于 5 - 8 月, 年蒸发量为 1 002.6 mm。2007 年 9 月上旬开始在柑橘 *Citrus reticulata* 林下设置不同的养鸡密度(0, 600, 1 200 和 2 400 只 $\cdot\text{hm}^{-2}$ )进行长期养鸡试验, 研究养鸡对土壤理化性质的影响。柑橘林下鸡的放养时间是每年的 9 月上旬至第 2 年的 4 月中下旬, 5 - 8 月林下不养鸡。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地调查和样本采集 试验地柑橘园建于 2000 年, 株行距为  $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ , 土壤为黄壤。在调查柑橘园试验区的基础上, 根据典型性、代表性的原则, 分别在坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致的柑橘园中设置不同养鸡密度处理(0, 600, 1 200 和 2 400 只 $\cdot\text{hm}^{-2}$ , 以下分别以 ck,  $T_{600}$ ,  $T_{1200}$  和  $T_{2400}$  表示)。设置 3 次重复 $\cdot$ 处理<sup>-1</sup>, 共 12 个小区, 各小区面积为  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。各小区用丝网隔离, 鸡群在限定的养殖区活动, 以保证其密度。选择大小基本一致的脱温雏鸡进行放养; 放养期间鸡苗如意外死亡, 应及时清理后补充与该群体平均质量相当的健康鸡苗, 保证小区鸡密度恒定。各试验小区柑橘及鸡苗的管理均按常规进行, 鸡饲料的投放量按鸡数量等比例增加。于 2012 年 8 月上旬在每个标准地内采用蛇形 5 点

取样法分别采集 0 ~ 20 cm 土层混合样品，带回实验室后分成 2 份，一份鲜样用于测定微生物数量，另一份风干后用于测定土壤团聚体、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶。同时用环刀采集 0 ~ 20 cm 土层原状土壤样品以测定土壤容重和孔隙度。

1.2.2 测定方法 土壤团聚体组成采用机械筛分法；土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加热法测定；土壤全氮采用半微量凯氏法；碱解氮采用碱解-扩散法；有效磷采用双酸浸提法；速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法<sup>[18]</sup>；微生物数量采用平板法测定<sup>[19]</sup>，酶活性采用比色法测定<sup>[20]</sup>；土壤团聚体分形维数采用杨培岭法计算，分形维数的计算过程与方法如下<sup>[12, 21]</sup>：

具有自相似结构的多孔介质——土壤，由大于某一粒径  $d_i (d_i > d_{i+1}, i = 1, 2, \dots)$  的土粒构成的体积  $V(\delta > d_i)$  可由类似 Katz 的公式表示：

$$V(\delta > d_i) = A [1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (1)$$

式(1)中： $\delta$  是码尺； $A$ ， $k$  是描述形状、尺度的常数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的颗粒质量分布表示的，以  $\bar{d}_i$  表示两筛分粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均值，忽略各粒级间土粒比重  $\rho$  的差异，即  $\rho_i = \rho (i = 1, 2, \dots)$ ，则：

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i)\rho = \rho A [1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式(2)中： $W(\delta > \bar{d}_i)$  为大于  $\bar{d}_i$  的累积土粒质量。以  $W_0$  表示土壤各粒级质量的总和，由定义有  $\lim_{i \rightarrow \infty} d_i = 0$ ，则由式(2)得：

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} (\delta > \bar{d}_i) = \rho A \quad (3)$$

由式(2)和式(3)导出：

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{k}\right)^{3-D} \quad (4)$$

设  $\bar{d}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径， $W(\delta > \bar{d}_{\max})$ ，代入(4)式有  $k = \bar{d}_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的质量分布与平均粒径间的分形关系式：

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} \quad (5)$$

$$\text{或} \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} \quad (6)$$

对上式两边取对数，即得：

$$(3-D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right) = \lg \left[\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0}\right] \quad (7)$$

分别以  $\lg(W_i/W_0)$ ， $\lg(d_i/\bar{d}_{\max})$  为纵、横坐标，不难看出  $3-D$  是  $\lg(d_i/\bar{d}_{\max})$  和  $\lg(W_i/W_0)$  的实验直线的斜率，因此，要测定  $D$  即可用回归分析方法。

1.2.3 数据处理与计算 采用 SPSS 19.0 软件对文中数据进行统计分析，表中数据均为平均值  $\pm$  标准差，采用单因子方差分析 (ANOVA) 和邓肯法 (SSR) 检验不同模式土壤各变量之间的显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团粒结构分形维数

由表 1 可知：各处理土壤分形维数(干筛和湿筛)、土壤结构体破坏率和不稳定团粒指数均呈现出  $ck > T_{600} > T_{1200} > T_{2400}$  变化规律，其中各处理间的分形维数(干筛和湿筛)差异显著， $T_{1200}$  与  $T_{600}$ ， $T_{600}$  与  $ck$  间的土壤结构体破坏率差异不显著，各处理间的不稳定团粒指数差异显著； $>0.25$  mm 粒级团聚体(干筛和湿筛)均呈现出  $ck < T_{600} < T_{1200} < T_{2400}$  的变化规律，且各处理间差异显著。回归分析发现，干筛条件下团聚体分形维数与  $>5.00$  mm， $5.00 \sim 2.00$  mm， $2.00 \sim 1.00$  mm， $1.00 \sim 0.50$  mm 和  $>0.25$  mm 粒级团聚体质量分数呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与  $0.50 \sim 0.25$  mm 粒级团聚体质量分数、结构体破坏率和不稳定团粒指数呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；湿筛条件下，土壤团聚体分形维数与  $>5.00$  mm， $5.00 \sim 2.00$  mm， $1.00 \sim 0.50$  mm 和  $>0.25$  mm 粒级团聚体质量分数呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与  $2.00 \sim 1.00$  mm，

表1 养鸡处理对土壤团聚体组成和分形维数的影响

Table 1 Effects of different raising chicken treatments on soil aggregate composition and fractal dimension

处理	不同粒径团聚体质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )					结构体破坏率/%	不稳定团聚指数/%	分形维数	相关系数	
	>5.00	5.00~2.00	2.00~1.00	1.00~0.50	0.50~0.25 mm					
T <sub>2400</sub>	I	275.9±18.5 a	327.7±18.7 a	182.5±15.9 b	116.4±11.2 d	59.3±4.3 d	12.6±1.7 c	21.1±1.4 d	2.174±0.028 d	0.991±0.004**
	II	104.2±9.9 a	206.3±11.7 a	170.2±12.1 a	168.0±7.5 a	139.8±5.8 a				
T <sub>1200</sub>	I	239.6±18.1 b	299.8±17.4 ab	191.6±10.5 ab	140.5±12.0 c	79.0±4.4 c	16.4±2.2 b	27.1±2.0 c	2.248±0.014 c	0.987±0.004**
	II	65.6±9.2 b	124.9±11.9 b	141.1±11.3 b	205.7±17.0 b	191.5±6.3 b				
T <sub>600</sub>	I	195.1±17.0 c	276.4±25.9 bc	202.5±4.2 ab	161.4±6.3 b	98.1±7.9 b	18.7±0.5 ab	32.1±1.7 b	2.321±0.031 b	0.983±0.001**
	II	49.7±6.7 c	75.4±7.5 c	119.7±5.2 c	222.3±19.2 b	212.2±17.7 ab				
ck	I	153.0±12.1 d	248.5±5.4 c	213.1±16.0 a	182.0±7.9 a	119.8±8.0 a	20.5±1.2 a	36.7±1.8 a	2.381±0.025 a	0.976±0.004**
	II	22.2±3.3 d	47.1±5.0 d	74.8±5.4 d	259.9±23.2 a	229.2±18.0 a				

说明：I 为干筛条件；II 为湿筛条件。同一列数据后不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

0.50 ~ 0.25 mm 粒级团聚体质量分数、结构体破坏率和不稳定团聚指数呈显著正相关( $P<0.05$ )。因此，林下养鸡增加土壤团聚体及水稳性团聚体质量分数，降低土壤结构体破坏率和提高土壤结构体稳定性。土壤团聚体分形维数可以表征林下养鸡对各粒级团聚体质量分数状况及土壤结构与稳定性的影响。

## 2.2 分形维数与土壤理化性质的关系

与 ck 相比(表 2)，T<sub>600</sub>、T<sub>1200</sub> 和 T<sub>2400</sub> 处理土壤容重分别降低 2.6%、9.7% 和 12.0%，各处理除 T<sub>600</sub> 外均与 ck 差异显著，T<sub>1200</sub> 与 T<sub>2400</sub> 处理间差异无显著；非毛管孔隙仅 T<sub>2400</sub> 处理显著高于 ck，但两者与其余处理差异不显著；毛管孔隙各处理间差异无显著；总孔隙仅 T<sub>2400</sub> 处理显著高于 ck 处理，其他处理与 ck 差异不显著，T<sub>1200</sub> 与 T<sub>2400</sub> 处理差异不显著。对土壤物理性质与土壤团聚体分形维数回归分析结果表明(表 3)：土壤团聚体分形维数(干筛和湿筛)与土壤容重、非毛管孔隙、毛管孔隙和总孔隙间呈显著或极显著相关。说明林下养鸡对提高土壤物理性质具有较好的作用；团聚体分形维数越低，土壤物理性质越好。因此，土壤团聚体分形维数的高低能够表征柑橘林下养鸡对土壤物理性质的影响。

各处理间土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾质量分数差异显著(表 2)。与 ck 相比，T<sub>600</sub>、T<sub>1200</sub> 和 T<sub>2400</sub> 处理有机质质量分数分别增加 26.5%、44.4% 和 66.7%；碱解氮分别增加 45.7%、69.6% 和 110.0%；有效磷分别增加 15.2 倍、20.9 倍和 29.1 倍；速效钾分别增加 1.3 倍、2.3 倍和 3.5 倍。对土壤养分与土壤团聚体分形维数回归分析结果表明(表 3)：干筛和湿筛得到的土壤团聚体分形维数与土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均呈极显著负相关。说明柑橘林下养鸡条件下土壤团聚体分形维数越高，土壤养分含量越低。因此，土壤团聚体分形维数的高低能够表征土壤养分状况。

表2 养鸡对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of different raising chicken treatments on soil physical and chemical properties

处理	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	非毛管孔隙/%	毛管孔隙/%	总孔隙/%	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )
T <sub>2400</sub>	1.165 ± 0.039 b	14.1 ± 0.7 a	36.2 ± 1.3 a	50.3 ± 0.9 a	27.0 ± 0.7 a	130.4 ± 8.8 a	108.2 ± 12.6 a	177.3 ± 11.8 a
T <sub>1200</sub>	1.196 ± 0.047 b	13.0 ± 1.0 ab	35.9 ± 0.7 a	48.9 ± 1.6 ab	23.4 ± 0.6 b	105.3 ± 6.4 b	79.0 ± 7.3 b	129.4 ± 14.4 b
T <sub>600</sub>	1.289 ± 0.045 a	12.6 ± 0.9 ab	35.2 ± 1.0 a	47.8 ± 1.1 b	20.5 ± 0.6 c	90.5 ± 6.6 c	58.3 ± 6.0 c	90.5 ± 7.2 c
ck	1.324 ± 0.036 a	12.2 ± 0.8 b	34.8 ± 1.4 a	47.0 ± 0.9 b	16.2 ± 0.8 d	62.1 ± 4.4 d	3.6 ± 0.5 d	39.2 ± 3.5 d

说明：同一列数据后不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 分形维数与土壤微生物和酶的关系

由表 4 可知：各处理间细菌、真菌、放线菌和总微生物数量、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性差异显著。与 ck 相比，T<sub>600</sub>、T<sub>1200</sub> 和 T<sub>2400</sub> 处理细菌数量分别增加 73.3%、177.5% 和 221.9%；真菌数量分别增加 46.2%、75.7% 和 213.8%；放线菌数量分别增加 57.6%、81.8% 和 133.2%；总微生物数量分别增加 72.9%、175.6% 和 220.2%；蔗糖酶活性分别增加 22.4%、35.2% 和 75.4%；脲酶活性分别增加 70.2%、104.5% 和 179.2%；磷酸酶活性分别增加 178.1%、207.0% 和 400.4%。对土壤微生物数量及酶活性与土壤团聚体分形维数回归分析结果表明(表 5)，土壤团聚体分形维数(干筛和湿筛)与细菌、真菌、放

表 3 分形维数与土壤理化性质的关系

Table 3 Relationship between fractal dimension and soil physical and chemical properties

项目	拟合回归方程		相关系数	
	干筛条件	湿筛条件	干筛条件	湿筛条件
容重	$D=1.036\ 3+1.001\ 1x$	$D=1.850\ 2+0.678\ 0x$	0.914**	0.861**
非毛管孔隙	$D=3.122\ 4-0.064\ 9x$	$D=3.256\ 2-0.043\ 5x$	-0.779**	-0.725**
毛管孔隙	$D=3.230\ 0-0.026\ 7x$	$D=3.454\ 7-0.021\ 4x$	-0.646*	-0.599*
总孔隙	$D=4.101\ 7-0.037\ 5x$	$D=3.994\ 4-0.026\ 8x$	-0.730**	-0.726**
有机质	$D=2.707\ 9-0.019\ 6x$	$D=2.991\ 5-0.013\ 7x$	-0.972**	-0.944**
碱解氮	$D=2.577\ 1-0.003\ 1x$	$D=2.898\ 1-0.002\ 1x$	-0.961**	-0.925**
有效磷	$D=2.402\ 5-0.002\ 0x$	$D=2.777\ 9-0.001\ 4x$	-0.941**	-0.913**
速效钾	$D=2.444\ 0-0.001\ 5x$	$D=2.809\ 8-0.001\ 1x$	-0.954**	-0.950**

说明：\* 表示在 0.05 水平上相关，\*\* 表示在 0.01 水平上相关。

表 4 养鸡对土壤微生物数量和酶活性的影响

Table 4 Effects of different raising chicken treatments on soil microbial population and enzyme activities

处理	微生物数量/(菌落形成单位·g <sup>-1</sup> )				蔗糖酶/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	脲酶/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	磷酸酶/ (mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )
	细菌(×10 <sup>7</sup> )	真菌(×10 <sup>3</sup> )	放线菌(×10 <sup>5</sup> )	总微生物(×10 <sup>7</sup> )			
T <sub>240</sub>	10.59 ± 0.51 a	7.75 ± 0.43 a	16.79 ± 0.91 a	10.76 ± 0.52 a	11.77 ± 0.54 a	0.497 ± 0.021 a	1.211 ± 0.099 a
T <sub>120</sub>	9.13 ± 0.40 b	4.34 ± 0.37 b	13.09 ± 0.72 b	9.26 ± 0.39 b	9.07 ± 0.25 b	0.364 ± 0.034 b	0.743 ± 0.055 b
T <sub>60</sub>	5.70 ± 0.56 c	3.61 ± 0.24 c	11.35 ± 0.48 c	5.81 ± 0.57 c	8.21 ± 0.37 c	0.303 ± 0.026 c	0.673 ± 0.066 b
ck	3.29 ± 0.30 d	2.47 ± 0.16 d	7.20 ± 0.62 d	3.36 ± 0.29 d	6.71 ± 0.57 d	0.178 ± 0.020 d	0.242 ± 0.030 c

说明：同一列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。

表 5 分形维数与土壤微生物数量和酶活性的关系

Table 5 Relationship between fractal dimension and microbial population or enzyme activities

项目	拟合回归方程		相关系数	
	干筛条件	湿筛条件	干筛条件	湿筛条件
细菌	$D=2.471\ 3-0.026\ 5x$	$D=2.828\ 4-0.018\ 9x$	-0.952**	-0.941**
真菌	$D=2.451\ 8-0.037\ 6x$	$D=2.818\ 4-0.027\ 6x$	-0.928**	-0.946**
放线菌	$D=2.546\ 2-0.021\ 9x$	$D=2.879\ 8-0.015\ 4x$	-0.952**	-0.932**
总微生物	$D=2.472\ 4-0.026\ 2x$	$D=2.829\ 2-0.018\ 6x$	-0.953**	-0.942**
蔗糖酶	$D=2.639\ 5-0.040\ 1x$	$D=2.958\ 1-0.029\ 6x$	-0.935**	-0.961**
脲酶	$D=2.502\ 6-0.660\ 6x$	$D=2.853\ 7-0.478\ 5x$	-0.958**	-0.965**
磷酸酶	$D=2.438\ 2-0.219\ 3x$	$D=2.806\ 9-0.158\ 6x$	-0.948**	-0.954**

说明：\*\* 表示在 0.01 水平上相关。

线菌和总微生物数量、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性均呈极显著负相关。因此，林下养鸡有利于提高土壤的生物活性，且土壤团粒结构分形维数能够表征土壤微生物数量和土壤酶活性的状况。

### 3 讨论

土壤团聚体组成、稳定性和孔隙状况对土壤肥力及结构稳定性有重要影响<sup>[3]</sup>。团聚体是土壤有机质的主要固存场所<sup>[22-23]</sup>，有机质是形成土壤团聚体主要的黏结剂<sup>[24-25]</sup>。本研究发现：柑橘林下养鸡后有机质含量增加，>0.25 mm 粒级团聚体(干筛和湿筛)质量分数也增加。林下养鸡和鸡粪还林增加土壤有机物质输入，使林地土壤有机胶体增加，土壤颗粒间胶结作用加强，土壤中大粒级团聚体增加和稳定性增强<sup>[26]</sup>。周萍等<sup>[27]</sup>研究发现：>0.25 mm 粒级团聚体越少，其分形维数越高，反之，则越低；何东进等<sup>[28]</sup>对毛竹 *Phyllostachys edulis*-杉木 *Cunninghamia lanceolata* 混交林土壤团粒结构分形特征的研究结果表明，土壤团粒结构分形维数与>0.25 mm 和>5.00 mm 粒级土壤水稳定性团聚体含量之间呈显著负相关。本研究发现：团聚体和水稳定性团聚体质量分数越高，分形维数越低，这与何东进等<sup>[28]</sup>的研究结果相同。李阳兵等<sup>[29]</sup>研究发现：土壤团聚体分形维数与其结构及稳定性关系密切，团粒结构粒径分布的分形维数越小，则土壤结构与稳定性越好。本研究发现，分形维数与土壤结构体破坏率和不稳定指数呈显著性正

相关, 团粒结构分形维数对结构体破坏率和不稳定指数具有较好的表征作用, 进一步说明土壤团粒结构分形维数与土壤结构及其稳定性关系密切。这与其他学者<sup>[29-31]</sup>的研究结果相同, 即 $>0.25$  mm 团聚体质量分数越高, 分形维数越低, 土壤孔性越好, 结构越稳定, 肥力越高。因此, 土壤团粒结构的分形维数可以作为表征土壤结构和性质的重要参数, 也可以作为表征土壤稳定性的指标, 是理想的土壤肥力评价指标<sup>[3, 21]</sup>。

土壤孔隙状况直接影响土壤通气性、透水性及根系穿插的难易程度, 对土壤中水、肥、气、热和生物活性等具有重要的调节作用<sup>[32]</sup>。柑橘林下养鸡后土壤容重降低, 而 $>0.25$  mm 粒级的团聚体质量分数(干筛和湿筛)、其他理化性质(容重除外)、微生物数量和酶活性均增加; 且随养鸡密度的增加, 土壤物理性质、化学性质及生化特性的影响作用加强, 并以 $2\ 400$ 只 $\cdot$ hm<sup>-2</sup>处理对土壤的改良效果最好。土壤容重的降低与孔隙度的提高主要是由于柑橘林下养鸡后, 鸡粪产量增多(即有机肥施入增多), 土壤变肥沃, 促进植物良好生长, 植物根系尤其是细根对土壤的穿插作用增强, 从而使土壤相对疏松多孔, 容重变小; 同时, 土壤中有机质提高, 有利于增加土壤中大粒径团聚体的形成与稳定, 且为土壤动物活动提供了相对更多的能源物质, 使土壤动物活动更为频繁, 对土壤的疏松起到了更好的促进作用<sup>[33-34]</sup>, 所以柑橘林下养鸡对改善土壤物理性质具有较好的促进作用。鸡粪中含有丰富的有机物质及氮、磷、钾等养分, 在鸡群粪尿排泄物施入土壤后, 这些养分直接增加了土壤养分含量和肥力。另外, 鸡粪有机肥输入林地土壤后为微生物活动提供了碳源、养分和丰富的酶促基质, 促进土壤微生物的生长和繁殖, 进而改善土壤理化性质和提高酶活性<sup>[35]</sup>。本研究结果发现, 土壤团粒结构分形维数与土壤容重、非毛管孔隙、毛管孔隙、总孔隙、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、细菌、真菌、放线菌、总微生物、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性呈显著或极显著相关。因此, 土壤团粒结构分形维数能够较好的评价林下养鸡后土壤理化性质变化、微生物数量和土壤酶活性状况, 是评价土壤肥力的一个综合性指标<sup>[29]</sup>。

#### 4 结论

柑橘林下养鸡能增加 $>0.25$  mm 粒径土壤团聚体和水稳性团聚体质量分数及稳定性, 降低团粒结构分形维数, 且在 $0 \sim 2\ 400$ 只 $\cdot$ hm<sup>-2</sup>密度范围内, 养鸡密度高, 分形维数低。柑橘林下养鸡能改良土壤结构和提升土壤肥力, 且在一定密度范围内( $0 \sim 2\ 400$ 只 $\cdot$ hm<sup>-2</sup>)土壤肥力随养鸡密度的增加而增加。无论湿筛还是干筛条件下, 土壤分形维数与 $>0.25$  mm 和 $>5.00$  mm 粒径团聚体质量分数呈显著相关。土壤团粒结构分形维数与土壤理化性质、微生物数量及酶活性均呈显著相关, 可以作为柑橘林下养鸡处理后土壤肥力变化的综合性评价指标。

#### 5 参考文献

- [1] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体稳定性研究[J]. 中国农学通报, 2005, **21**(10): 232 - 234.  
LI Yangbing, WEI Chaofu, XIE Deti, *et al.* The features of soil water-stable aggregate before and after vegetation destruction in karst mountains [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2005, **21**(10): 232 - 234.
- [2] 单桂梅, 张春平, 刘霞, 等. 沂蒙山区小流域坡耕地土壤颗粒结构与养分退化特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, **11**(5): 76 - 82.  
SHAN Guimei, ZHANG Chunping, LIU Xia, *et al.* Grain structure and nutrient degradation characteristics of soil from small watershed's sloping lands in Yimeng Mountainous areas [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2013, **11**(5): 76 - 82.
- [3] 谢贤健, 胡学华, 王珊, 等. 玉米不同育苗方式下土壤团聚体及颗粒分形特征[J]. 土壤通报, 2012, **43**(5): 1049 - 1053.  
XIE Xianjian, HU Xuehua, WANG Shan, *et al.* Soil aggregates and fractal features of corn field under different seedling raising styles [J]. *Chin J Soil Sci*, 2012, **43**(5): 1049 - 1053.
- [4] 陈礼海. 果树林下养鸡好处多[J]. 中国畜牧杂志, 1995, **31**(1): 56 - 57.  
CHEN Lihai. Raising chicken under fruit orchards brings benefits [J]. *Chin J Anim Sci*, 1995, **31**(1): 56 - 57.
- [5] 杨朝武, 杜华锐, 陈天宝, 等. 放养鸡生产对植被特征及土壤理化性质的影响研究[J]. 中国家禽, 2013, **35**

(17): 24 – 28.

YANG Chaowu, DU Huarui, CHEN Tianbao, *et al.* Effects of free-range broiler chickens on vegetation characteristics and physical-chemical properties of soil [J]. *China Poult*, 2013, **35**(17): 24 – 28.

[6] ALLISON R. Free range chicken grows on trees [J]. *Poult World*, 2005, **159**(1): 26 – 27.

[7] 刘婷霞, 邹泉楠, 温国胜. 林下养鸡对林地的影响[J]. 广东农业科学, 2013, **40**(7): 112 – 114.

LIU Tingxia, WU Xiaonan, WEN Guosheng. Effect of free range chicken in the undergrowth on woodland ecosystem [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2013, **40**(7): 112 – 114.

[8] 郭爱伟, 周杰珑, 熊春梅, 等. 林地放养鸡的研究进展[J]. 国外畜牧学·猪与禽, 2008, **28**(3): 66 – 67.

GUO Aiwei, ZHOU Jielong, XIONG Chunmei, *et al.* A review on free range chicken in the undergrowth [J]. *Pigs Poult*, 2008, **28**(3): 66 – 67.

[9] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(5): 144 – 148, 153.

YI Ya'nan, YIN Lichu, ZHANG Lei, *et al.* Effects of fertilization on aggregate composition and organic carbon distribution in paddy soil under different groundwater level [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27**(5): 144 – 148, 153.

[10] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(20): 4007 – 4015.

LI Wenjun, YANG Jifeng, PENG Baofa, *et al.* Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake plain of China [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, **47**(20): 4007 – 4015.

[11] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation [J]. *J Geophys Res*, 1986, **91**(B2): 1921 – 1926.

[12] 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 Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Use the weight-size distribution to characterize the soil fractal features [J]. *Chin Sci Bull*, 1993, **38**(20): 1896 – 1899.

[13] 文星跃, 黄成敏, 黄凤琴, 等. 岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2011(1): 80 – 86.

WEN Xingyue, HUANG Chengmin, HUANG Fengqin, *et al.* Fractal dimensions of soil particles and related affecting factors from the valley of upper Minjiang River [J]. *J South China Norm Univ Nat Sci Ed*, 2011(1): 80 – 86.

[14] 季轶群, 王子芳, 高明, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式下土壤团粒的分形特征[J]. 土壤通报, 2009, **40**(2): 221 – 225.

JI Yiqun, WANG Zifang, GAO Ming, *et al.* Fractal features of soil aggregate under different land-use types in purple hilly area [J]. *Chin J Soil Sci*, 2009, **40**(2): 221 – 225.

[15] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征[J]. 土壤, 2010, **42**(2): 302 – 308.

DONG Lili, ZHENG Fenli. Fractal characteristics of soil particle size distributions in gully-hilly regions of the loess plateau, north of Shaanxi, China [J]. *Soils*, 2010, **42**(2): 302 – 308.

[16] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征[J]. 草地学报, 2008, **16**(4): 396 – 402.

ZHOU Ping, LIU Guobin, HOU Xilu. Study on fractal features of soil microaggregates during different restoration stages in the Loess Hilly region [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2008, **16**(4): 396 – 402.

[17] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变[J]. 西安理工大学学报, 2009, **25**(4): 377 – 382.

ZHU Bingbing, LI Zhanbin, LI Peng, *et al.* Research on the fractal features of soil aggregate, and dynamic changes in anti-erodibility during the process of vegetation recovery on the Loess Hilly areas [J]. *J Xi'an Univ Technol*, 2009, **25**(4): 377 – 382.

[18] 中国标准出版社. 中国林业标准汇编: 营造林卷[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

[19] 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.

[20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[21] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, **36**(2): 162 – 167.

WU Chengzhen, HONG Wei. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management pat-

- terns [J]. *Acta Pedol Sin*, 1999, **36**(2): 162 – 167.
- [22] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, **48**(2): 412 – 418.  
DOU Sen, LI Kai, GUAN Song. A review on organic matter in soil aggregates [J]. *Acta Pedol Sin*, 2011, **48**(2): 412 – 418.
- [23] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, **39**(5): 787 – 793.  
GUO Juhua, CHEN Xiaoyun, LIU Manqiang, *et al.* Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil [J]. *Soils*, 2007, **39**(5): 787 – 793.
- [24] 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 Res*, 2004, **79**(1): 7 – 31.
- [25] 韩加强, 高晓飞, 路炳军, 等. 水保措施对褐土水稳性大团聚体的影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(6): 50 – 53.  
HAN Jiaqiang, GAO Xiaofei, LU Bingjun, *et al.* Research on the influence of measures of soil and water conservation on the water-stable macroaggregates in cinnamon soil [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2012, **19**(6): 50 – 53.
- [26] 李天杰, 郑应顺, 王云. 土壤地理学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [27] 周萍, 刘国彬, 候喜禄. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, **6**(2): 75 – 82.  
ZHOU Ping, LIU Guobin, HOU Xilu. Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the hilly-gully region of Loess Plateau [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2008, **6**(2): 75 – 82.
- [28] 何东进, 洪伟, 吴承祯, 等. 毛竹杉木混交林土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, **10**(3): 215 – 221.  
HE Dongjin, HONG Wei, WU Chengzhen, *et al.* Fractal features of soil aggregate structure under mixed plantations of *Phyllostachys edulis* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2002, **10**(3): 215 – 221.
- [29] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, **37**(1): 51 – 55.  
LI Yangbing, WEI Chaofu, XIE Deti, *et al.* The fractal features of soil aggregate structure before and after vegetation destruction on karst mountain areas [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, **37**(1): 51 – 55.
- [30] 廖尔华, 张世榕, 邓良基, 等. 丘陵区土壤颗粒的分形维数及其应用[J]. 四川农业大学学报, 2002, **20**(3): 242 – 245, 281.  
LIAO Erhua, ZHANG Shirong, DENG Liangji, *et al.* Fractal dimensions of particle in the hill area and their applications [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2002, **20**(3): 242 – 245, 281.
- [31] 王玉杰, 王云琦, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型林分土壤结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006, **4**(4): 39 – 46.  
WANG Yujie, WANG Yunqi, XIA Yiping, *et al.* Soil fractal features of typical forest stands in Jinyun mountain of Chongqing City [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, **4**(4): 39 – 46.
- [32] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, **21**(6): 700 – 706.  
DING Wenfeng, DING Dengshan. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau [J]. *Geogr Res*, 2002, **21**(6): 700 – 706.
- [33] 史振鑫, 吴景贵. 不同处理牛粪对黑土团聚体组成与稳定性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(4): 10 – 15.  
SHI Zhenxin, WU Jinggui. Composition and stability of the aggregates in black soil applied with different cattle manures [J]. *Soil Fertil Sci China*, 2013(4): 10 – 15.
- [34] 林东, 钟林茂, 郑鹏, 等. 梨树林下养鸡对土壤理化性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, **52**(18): 4346 – 4350.  
LIN Dong, ZHONG Linmao, ZHENG Peng, *et al.* Effects of raising chicken on soil physical and chemical properties in pear orchard [J]. *Hubei Agric Sci*, 2013, **52**(18): 4346 – 4350.
- [35] 高瑞, 吕家珑. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, **13**(1): 143 – 145.  
GAO Rui, LÜ Jialong. Study on the enzyme activities and fertility change of soils by a long-term located utilization of different fertilizers [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2005, **13**(1): 143 – 145.