

冰糖橙种植园土壤团聚体特征及其影响因素

宋彪, 周卫军, 商贵铎, 唐豆, 李敏, 岳晴晴

(湖南农业大学 资源与环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: [目的] 探究冰糖橙种植园土壤团聚体的特征以及影响因素, 为减少土壤侵蚀, 增加柑橘园土壤保水保肥能力提供科学参考。[方法] 采集板页岩风化物、紫色砂岩风化物、砂岩风化物、第四纪红土风化物发育的冰糖橙种植园土壤样本, 并同步收集相关的耕作、地理等信息; 采用土壤结构稳定性指标 $R_{0.25}$, GWD, MWD、分形维数(D)与土壤可蚀性 K 值对团聚体及其有机碳含量等进行方差分析、相关分析。[结果] ①粒径 >0.25 mm 的团聚体占总团聚体的 78%~85%。随着团聚体粒径减小, 分级土壤含量整体呈逐渐减小趋势。②4 种母质发育的土壤 GWD 在 0.536~0.797 之间; MWD 在 0.890~1.208 之间; 分形维数(D)在 2.434~2.480 之间; 土壤可蚀性 K 值在 0.060 8~0.069 7 之间。③有机碳含量随着粒径增大先减小后增大趋势, 整体上呈 V 形分布, 其中 0.250~0.053 mm 微团聚体的有机碳含量最低; 大团聚体的有机碳相对贡献率在 82%~87%。④随着种植年限增加, 外源有机碳的不断输入, 土壤结构稳定性指标 $R_{0.25}$, GWD 与 MWD 极显著增大, 分形维数(D)与土壤可蚀性 K 值极显著减小; 说明土壤结构的稳定性在不断增强。[结论] 研究区冰糖橙种植园大团聚体含量高, 土壤稳定性较强; 且各母质的土壤稳定性处于同一水平。成土母质的砂粒含量与人为扰动直接对团聚体稳定性产生作用、外源有机碳、种植年限, 纬度与海拔共同作用于有机胶结物质来影响土壤稳定性。

关键词: 冰糖橙; 成土母质; 团聚体; 有机碳; 土壤稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0034-09

中图分类号: S152.4

文献参数: 宋彪, 周卫军, 商贵铎, 等. 冰糖橙种植园土壤团聚体特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 34-42. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.005; Song Biao, Zhou Weijun, Shang Guiduo, et al. Characteristics of soil aggregates and factors influencing Bingsugar orange orchards [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 34-42.

Characteristics of Soil Aggregates and Factors Influencing Bingsugar Orange Orchards

Song Biao, Zhou Weijun, Shang Guiduo, Tang Dou, Li Min, Yue Qingqing

(College of Resources & Environment, Hunan Agriculture University, Changsha, Hu'nan 410128, China)

Abstract: [Objective] The soil aggregates of Bingsugar orange orchards and the factors affecting them were characterized in order to reduce soil erosion and increase the water and fertility retention capacity of citrus orchards. [Methods] Soil samples were collected from weathered slate, weathered purple sandstone, sandstone, and weathered Quaternary laterite developed in a Bingsugar orange orchard. Related tillage and geographic information were collected simultaneously. ANOVA and correlation analysis were performed on the agglomerated data and their organic carbon contents using soil structural stability indexes $R_{0.25}$, GWD, MWD, fractal dimension (D), and soil erodibility K value. [Results] ① Agglomerates with particle sizes >0.25 mm accounted for 78%~85% of the total agglomerates. Graded soil content gradually decreased with decreasing agglomerate particle size. ② The GWD of the soils developed by the four matrices ranged from 0.536~0.797; MWD ranged from 0.890~1.208; fractal dimension (D) ranged from 2.434~2.480; and soil erodibility K value ranged from 0.060 8~0.0 697. ③ Organic carbon content decreased with increasing particle size and then increased, with an overall V-shaped distribution. Organic carbon content of the 0.250~

收稿日期: 2022-06-16

修回日期: 2022-09-09

资助项目: 国家现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-26)

第一作者: 宋彪(1997—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 硕士研究生, 研究方向为柑橘土壤特征。Email: songbiaoet@163.com。

通讯作者: 周卫军(1966—), 男(汉族), 湖南省常德市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态系统物质循环转化及其过程模拟的研究。Email: wjzh0108@163.com。

0.053 mm microaggregates was the lowest. The relative contribution of organic carbon of large agglomerates was 82% ~ 87%. ④ Soil structure stability indexes $R_{0.25}$, GWD, and MWD significantly increased with increasing number of planting years and the continuous input of exogenous organic carbon. Fractal dimension (D) and soil erodibility K values significantly decreased at the same time, indicating increasing soil structure stability. [Conclusion] Soil stability was high with high content of large agglomerates in a Bingsugar orange orchard in Hu'nan Province. The soil stability of each parent material was at the same level. Sand content of the soil-forming parent material and anthropogenic disturbance directly affected the role of agglomerate stability, exogenous organic carbon, and planting years. Latitude and altitude jointly influence soil stability by organic colloidal material. The sand content of the parent material and anthropogenic disturbance directly contribute to the stability of the aggregates. Exogenous organic carbon, age of cultivation, latitude and altitude combine to influence soil stability through the organic cementing material.

Keywords: Bingsugar orange orchard; soil-forming matrix; aggregate; organic carbon; soil stability

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,其含量和稳定性不仅作为评价土壤抗蚀性的重要指标,而且能反映土壤的结构性质,影响土壤质量^[1]。土壤团聚体的粒级大小及分布会影响土壤的通气性、透水性和保肥利墒能力,从而进一步影响土壤的基本属性和土壤的质量高低^[2]。团聚体的结构与稳定性受成土母质,气候条件,土地利用方式,种植年限等因素影响。其中成土母质是土壤形成的物质基础,可以影响土壤的养分状况和物理化学性质,从而调控一系列生物化学过程^[3]。

不同母质发育土壤的物理和化学性质存在很大差异^[4]。在毛霞丽^[5]的研究中不同母质发育土壤间总有机碳储量差异显著,其中以石灰岩发育土壤中最高,而红砂岩发育土壤中最低。邬奇峰等^[6]人研究 3 类石灰岩发育的土壤中团聚体稳定性、稳定性有机碳比例存在一定的差异,黑色石灰岩土最高,红色石灰岩土最低。谷忠元^[7]对湘东地区典型土壤团聚体稳定性影响研究中表明在不同成土母质下,土壤黏粒、游离氧化铁含量性质均具有一定的差异性。同时成土母质、气候条件、利用方式等其他因素改变土壤质地、有机质累积含量状况,间接改变土壤团聚体的稳定性。李强等^[8]人的研究中,海拔和有机质对土壤颗粒含量及其分形维数(D)有一定影响。林哲等^[1]人研究中团聚体稳定性受种植年限的影响,开发年份越久, >0.25 mm 的团聚体质量分数越高,MWD 值越大,RSI,RMI, K 值越小,团聚体越稳定。土壤的耕作方式上,刘杰等^[9]人通过对比农耕地和果园土壤利用状况得出农耕地易导致大团聚体破碎,土壤结构退化,果园更有利于维持或提高土壤团聚体的稳定性,维系土壤良好结构。

土壤团聚体对其所生长的农作物有着重大的支撑作用。2000 年以来,我国柑橘产量、种植面积和单产均呈现不断增加的趋势^[10]。冰糖橙属于柑橘的一个品种,发源于现湖南省洪江市,种植区域多为山地

丘陵地带,土壤母质种类繁多,土壤团聚体的结构与稳定性是冰糖橙产量、质量的一个影响因素;土壤团聚体不仅保障这些丘陵地区的水土不受侵蚀,而且固持水分等必要营养元素,提供柑橘良好的生态环境,保障柑橘的产量品质。因此,本研究选取湖南省怀化市洪江市、芷江县和郴州市永兴县的冰糖橙为研究对象,研究不同母质下冰糖橙水稳定团聚体状况,有机碳的分布以及相关影响因子,服务于冰糖橙园土壤稳定性的保护与提升,增强生态体系的整体稳定性;为相关母质发育的冰糖橙土壤团聚体提供土壤结构改良、耕作方式调整的参考,具有实际可行的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试冰糖橙土壤采集自湖南省怀化市洪江市(109°32'—110°31'E,26°59'—27°29'N),湖南省郴州市永兴县(112°42'—113°33'E,25°55'—26°30'N),湖南省怀化市芷江县(109°17'—109°54'E,27°04'—27°38'N)。其中洪江市属中亚热带季风气候、多山地丘陵,平均海拔在 300~400 m 之间,年均无霜期为 287 d,成土母质为河流冲积物、砂砾岩、变质岩和第四纪红土。永兴县属中亚热带大陆湿润季风气候,多为山丘气候类型,土壤以板页岩红壤为主。芷江县属亚热带季风湿润气候区,年降雨量 1 156~1 433 mm,成土母质有板页岩、紫色砂岩,多山地和丘陵。

1.2 供试土样的采集与处理

在湖南省 3 个县典型的冰糖橙园中,种植规模平均 750 株/hm²;除通过沟施方法施加有机肥(2~5 kg/株)和化肥(1~2 kg/株)外,极少数有人工灌溉、除草的情况。2020 年 11 月至 2021 年 1 月采集土样,根据成土母质为参考依据,采用五点法采集 41 个土壤样品,其中成土母质为板页岩风化物的样品数为 25 个、紫色砂岩风化物为 7 个、砂岩风化物为 5 个、

第四纪红土风化物为 4 个,种植年限为 0~44 a。每个混合样由 5 棵冰糖橙滴水线下的土样组成,这 5 棵树选取时依据 S 形走势,由下往上择取有代表性的样点依次采集。每个采样点沿冰糖橙树冠投影边向主干推 10—20 cm,采集 0—40 cm 土层样品,按四分法分取 1 kg 左右的新鲜土壤样品^[11]。采样后将土壤样品带回进行自然风干,剔除石子、根系,全部通过 8 mm 筛,继续风干并通过相关孔径土筛,进行相关理化分析;并对土壤样本采集时实地测量记录的经纬度、海拔等信息进行整理。

1.3 样品分析

土壤团聚体分级采用湿筛法。取 50 g 自然风干后的原状土壤样品,置入不锈钢套筛,淹水浸没

5 min,调节仪器上下震动频率每 2 min 震动 50 次,上下幅度 3 cm,震动时间 10 min。分离取得粒级为 >2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,0.25~0.053 和 <0.053 mm 的 6 级颗粒组分,将分级处理后的土样完全干燥后称重,计算各粒级团聚体的比例;测定有机碳含量。

土壤总有机碳、各粒级有机碳采用重铬酸钾氧化一外加热法测定。土壤全氮测定采用凯氏定氮法。全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法,全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采样碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法。缓效钾采用硝酸煮沸法—火焰光度法。冰糖橙园不同母质的土壤基础理化性状与信息详见表 1。

表 1 冰糖橙园不同母质的土壤理化性状

Table 1 Soil physicochemical properties of different parent materials in a Bingsugar orange orchard

指标	成土母质			
	板页岩风化物	第四纪红土风化物	砂岩风化物	紫色砂岩风化物
容重/(g·cm ⁻³)	1.29±0.15 ^a	1.16±0.13 ^a	1.50±0.26 ^a	1.40±0.08 ^a
有机质/(g·kg ⁻¹)	29.05±9.06 ^a	16.65±7.61 ^b	23.46±7.02 ^{ab}	18.78±2.57 ^b
pH 值	5.07±0.52 ^a	4.64±0.58 ^a	5.21±1.71 ^a	5.22±0.34 ^a
全氮/(g·kg ⁻¹)	2.87±1.47 ^a	2.24±0.67 ^{ab}	1.88±0.31 ^b	2.07±0.93 ^{ab}
全磷/(g·kg ⁻¹)	1.09±0.77 ^a	0.48±0.34 ^{ab}	0.33±0.21 ^b	0.79±0.42 ^{ab}
全钾/(g·kg ⁻¹)	14.22±7.28 ^a	18.36±2.32 ^a	12.06±3.64 ^a	17.08±2.25 ^a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	106.8±31.02 ^a	78.39±26.59 ^{ab}	59.51±19.04 ^b	86.31±20.75 ^{ab}
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	105.3±94.54 ^a	23.51±26.53 ^b	30.33±25.40 ^b	77.05±57.89 ^{ab}
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	160.4±63.91 ^b	162.2±74.69 ^b	122.7±76.01 ^b	258.4±134.13 ^a
缓效钾/(mg·kg ⁻¹)	197.9±80.41 ^{bc}	276.7±127.14 ^b	151.3±18.78 ^c	416.8±159.41 ^a
经度/(°)	111.78	113.21	113.21	110.59
纬度/(°)	26.61	26.22	26.21	27.00
海拔/m	187.87	159.60	160.52	234.74
种植年限/a	26.3	9.5	10.6	21.7

注:数字为平均值±标准差;小写字母表示不同母质发育土壤之间差异显著性($p<0.05$)。下同。

1.4 数据处理

(1) >0.25 mm 的团聚体 $R_{0.25}$ 计算了公式^[12]为:

$$R_{0.25} = M_r / M_t \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_r 是水稳性大团聚体的量(g); M_t 是湿筛前团聚体的总量(g)。

(2) 土壤团聚体平均重量直径计算了公式^[13]为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

式中: x_i 为 i 粒级团聚体的平均直径; w_i 为 i 粒级团聚体百分含量。

(3) 土壤团聚体几何平均直径计算了公式为:

$$GWD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right) \quad (3)$$

式中: x_i 为 i 粒级团聚体的平均直径; w_i 为 i 粒级团聚体百分含量。

(4) 土壤团聚体分形维数计算了公式为:

$$D = 3 - \lg\left(\frac{M_{(i < x_i)}}{M_t}\right) / \lg\left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}}\right) \quad (4)$$

式中: $M_{(i < x_i)}$ 为粒级 < X_i 的团聚体含量; M_t 为各粒级团聚体含量的总和; x_i 为 i 粒级团聚体的平均直径; X_{\max} 为最大粒级团聚体的平均直径^[14]。

(5) 土壤可蚀性 K 值估算。根据几何平均粒级模型法(Shirazi 公式)^[15],变形换算后的公式为^[16]:

$$K = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg GMD + 1.659}{0.7101}\right)^2\right] \right\} \quad (5)$$

式中:GMD 是该土壤的几何平均粒径。

(6) 土壤团聚体有机碳贡献率计算了公式^[17]为:

$$P = (S \times W) / Q \times 100\% \quad (6)$$

式中: S 为该级团聚体机碳含量(g/kg); W 为该级团聚体含量; Q 为土壤总有机碳含量(g/kg)。

1.5 统计分析

数据整理用 Excel 进行;统计分析用 SPSS 20.0 进行,采用单因素方差分析(one-way ANOVA),采用最小差异法(LSD)、邓肯法(Duncan)、非参数检验(Tamhane's T2)进行差异显著性检验,采用皮尔逊法(Pearson)进行相关性分析;数据作图用 Origin-Pro2022 进行相关图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 冰糖橙土壤团聚体粒级的分布与稳定性特征

由表 2 可知,4 种母质的水稳定性大团聚含量均超过 78%,相互之间没有显著性差异;大团聚体含量由高到低依次为:紫色砂岩风化物、板页岩风化物、第四纪红土风化物、砂岩风化物。紫色砂岩风化物、砂岩风化物、板页岩风化物中 > 2 mm 大团聚体的含

量,显著高于第四纪红土风化物的含量。第四纪红土风化物发育的土壤中 0.5~1 mm 大团聚体占比其他 3 种母质高出 33%。紫色砂岩风化物、板页岩风化物、砂岩风化物中 > 0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量随粒径增大而逐渐增加。由表 3 可知,4 种成土母质发育土壤的团聚体的几何平均直径(GMD)在 0.536~0.797 之间,无显著性差异;紫色砂岩风化物与第四纪红土风化物发育的土壤平均重量直径(MWD)存在显著差异。各母质发育的土壤分形维数(D)在 2.434~2.480 之间,无显著性差异。说明 4 种成土母质发育的土壤结构稳定性一致,土壤可蚀性 K 在 0.060 8~0.069 7 之间,表明 4 种母质发育的土壤可蚀性没有差异。结合图 1 所示,除了第四纪红土风化物发育的团聚体外,板页岩风化物、砂岩风化物、紫色砂岩风化物之间存在显著或极显著性相关($p < 0.05, p < 0.01$),4 种母质发育的土壤团聚体含量分布相似度较高,具有相同的变化趋势。

表 2 不同母质土壤团聚体各粒级含量

Table 2 Content of soil agglomerates of different parent materials by particle size

成土母质	水稳性团聚体含量/%						$R_{0.25}$ 含量/%
	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	
板页岩风化物	29.91±13.26 ^{ab}	16.55±4.31 ^a	18.64±5.06 ^{ab}	15.34±3.88 ^{ab}	8.35±2.62 ^a	11.18±7.69 ^a	80.46±9.27 ^a
第四纪红土风化物	17.32±6.34 ^b	17.87±3.08 ^a	24.45±4.28 ^a	18.82±4.13 ^a	12.26±2.79 ^a	9.26±1.89 ^a	78.47±3.60 ^a
砂岩风化物	25.43±13.11 ^{ab}	16.10±1.27 ^a	18.90±5.29 ^{ab}	17.89±4.85 ^a	11.41±5.47 ^a	10.25±5.42 ^a	78.33±6.93 ^a
紫色砂岩风化物	36.41±13.12 ^a	19.35±2.65 ^a	17.47±6.41 ^b	12.14±3.49 ^b	6.83±1.54 ^a	7.76±3.24 ^a	85.39±4.54 ^a

表 3 不同母质土壤团聚体的稳定性

Table 3 Stability of soil aggregates of different parent materials

成土母质	平均重量直径 MWD	几何平均直径 GMD	分形维数 D	土壤可蚀性 K
第四纪红土风化物	0.890±0.098 ^b	0.536±0.073 ^a	2.434±0.457 ^a	0.069 7±0.004 2 ^a
砂岩风化物	0.979±0.184 ^{ab}	0.579±0.158 ^a	2.467±0.117 ^a	0.068 7±0.007 5 ^a
板页岩风化物	1.060±0.227 ^{ab}	0.655±0.234 ^a	2.480±0.134 ^a	0.067 3±0.011 1 ^a
紫色砂岩风化物	1.208±0.177 ^a	0.797±0.181 ^a	2.451±0.094 ^a	0.060 8±0.005 4 ^a

注: * 表示显著水平为 $p < 0.05$, ** 表示显著水平为 $p < 0.01$, *** 表示显著水平为 $p < 0.001$ 。

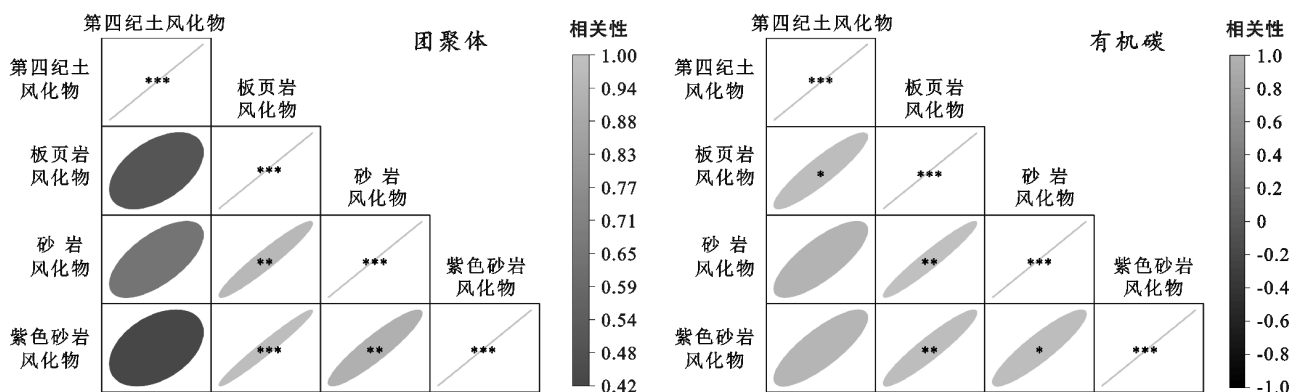
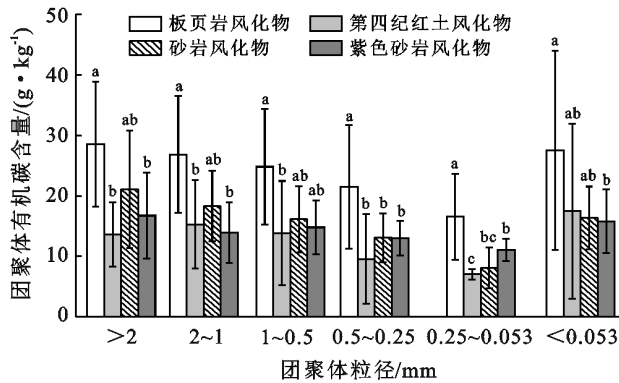


图 1 不同母质发育团聚体分级含量相似相关性和有机碳含量相似相关性

Fig.1 Similar correlation between the graded content of different parent material developmental agglomerates and similar correlation between the organic carbon content

2.2 冰糖橙土壤团聚体有机碳含量特征

各母质发育的冰糖橙种植园土壤各粒级团聚体有机碳含量的分布如图 2 所示。板页岩风化物发育的土壤各粒级团聚体有机碳含量均最高,且显著高于其他母质发育土壤。板页岩风化物与第四纪红土风化物发育的土壤有机质含量在 >0.053 mm 的各对应粒级上均存在显著性差异。各母质中 $0.053 \sim 0.25$ mm 微团聚体的有机质含量最低; <0.053 mm 团聚体的有机质含量相对于 $0.053 \sim 0.25$ mm 微团聚体的有机质含量均出现一个显著陡增,其中第四纪红土风化物的团聚体含碳量增加最多。结合图 1 的结果,4 种母质发育的团聚体在各粒级的有机碳含量存在显著性正相似相关($p < 0.05$, $p < 0.01$),各母质发育的土壤各粒级团聚体有机碳含量变化趋势一致,即随着团聚体粒径减小,有机碳含量有先减少后增加的趋势,呈现出 V 形分布。



注:不同小写字母表示不同母质之间差异显著性($p < 0.05$)。

图 2 不同母质土壤团聚体各粒级有机碳含量

Fig.2 Organic carbon content by particle size in soil aggregates of different parent materials

2.3 冰糖橙土壤团聚体有机碳贡献率特征

不同粒级土壤团聚体有机碳含量对总有机碳的贡献率如图 3 所示。各成土母质发育的土壤中大团聚体有机碳相对贡献率最大,在 $82\% \sim 87\%$ 之间,说明冰糖橙种植园土壤中有机碳主要位于大团聚体中,大团聚体是冰糖橙种植园土壤中有机碳保存的主要场所。板页岩风化物、砂岩风化物、紫色砂岩风化物母质发育的土壤中, >2 mm 大团聚体有机碳的相对贡献率最大,比第四纪红土风化物有机碳贡献率高出 $10\% \sim 20\%$ 。第四纪红土风化物在 $0.5 \sim 1$ mm 大团聚体里有机碳相对贡献率最大,占总贡献率的 25.45% 。4 种成土母质中 <0.053 mm 粉黏粒团聚体有机碳贡献率均高于 $0.053 \sim 0.25$ mm 微团聚体,同时 <0.053 mm 粉黏粒团聚体含量比 $0.053 \sim 0.25$ mm 微团聚体含量少;表明该粒级有机碳稳定性高,有机碳

在土壤中有较长的时间进行累积,并没有被微生物等进行有效利用。大团聚体有机碳能被微生物等土壤动物进行利用和矿化作用,大团聚体有机碳含量高、贡献率大说明土壤中有有机质可利用率高,有利于土壤微生物的生存,保持土壤的化学结构稳定。

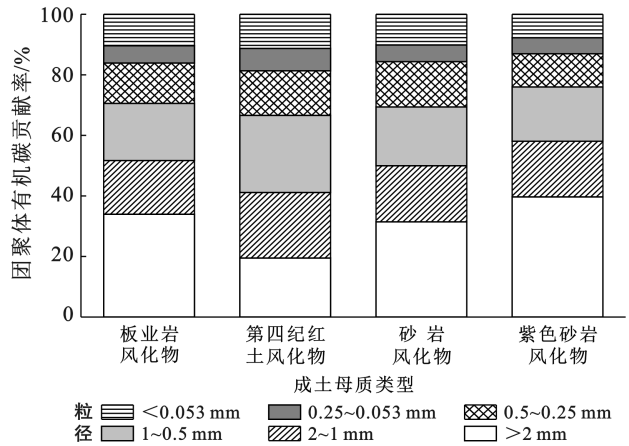
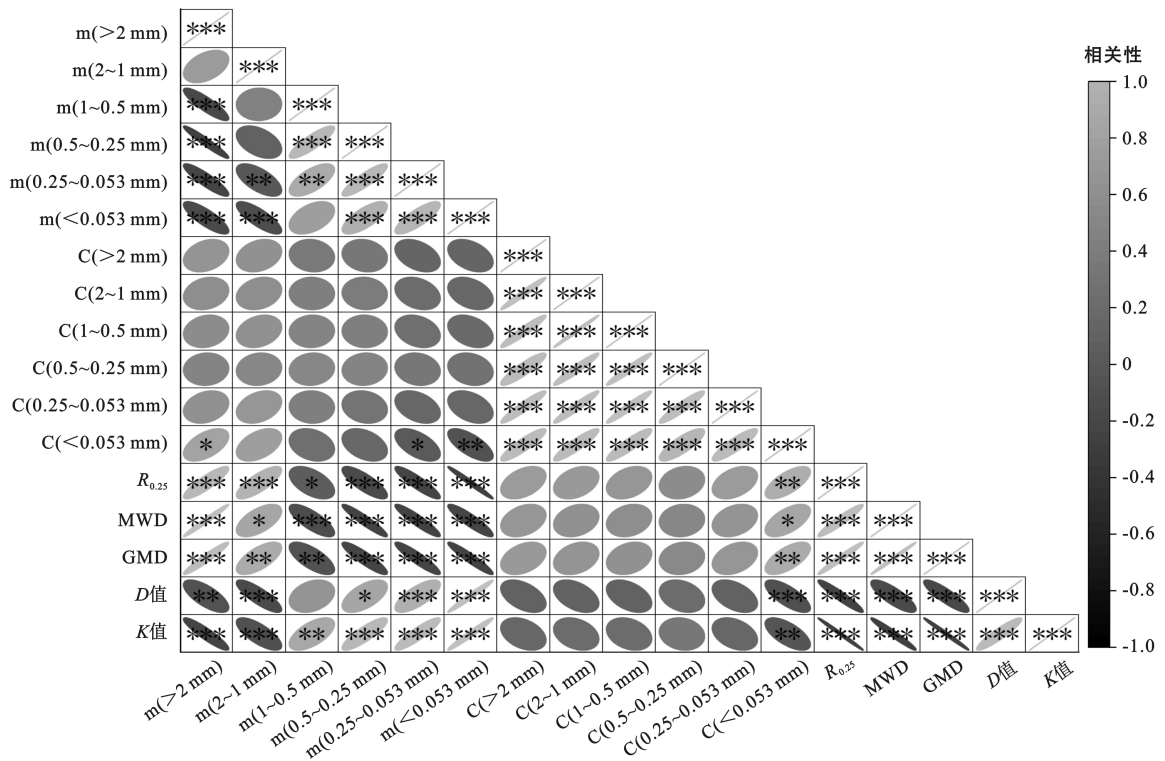


图 3 4 种母质发育团聚体各粒级有机碳对土壤总有机碳的贡献率

Fig.3 Contribution of organic carbon to total soil organic carbon at each particle level in four parent material development agglomerates

2.4 土壤团聚体稳定性指标影响因素分析

冰糖橙种植园土壤团聚体稳定性与土壤各级团聚体以及各级有机碳的相关性如图 4 所示。由图 4 可知,土壤 MWD 和 GMD 均与分形维数(D)显著负相关($p < 0.01$)^[18],且与土壤可蚀性 K 值为显著负相关($p < 0.05$)。土壤团聚体 GMD, MWD 与 >2 mm 大团聚体呈极显著正相关($p < 0.01$),与 $0.5 \sim 1$ mm, $0.25 \sim 0.5$ mm, $0.053 \sim 0.25$ mm, $0 \sim 0.053$ mm 的团聚体极显著负相关($p < 0.01$);与 $R_{0.25}$ 极显著正相关($p < 0.01$)。土壤团聚体分形维数(D)、土壤可蚀性 K 值与 >2 mm、 $1 \sim 2$ mm 大团聚体呈极显著负相关($p < 0.01$),与 <0.053 mm 粉黏粒团聚体极显著正相关($p < 0.01$),与 >0.25 mm 大团聚体极显著负相关($p < 0.01$)。土壤团聚体 MWD, GMD 与 <0.053 mm 粉黏粒团聚体有机碳呈显著正相关($p < 0.05$), $R_{0.25}$ 与 <0.053 mm 粉黏粒团聚体有机碳成极显著正相关($p < 0.01$)。土壤团聚体的 MWD, GMD 与各粒级有机碳含量呈现正相关;土壤可蚀性 K 值、分形维数(D)与各粒级有机碳含量呈负相关。整体上各粒级团聚体含量与各级团聚体有机碳之间不存在明显的相关性,仅在 <0.053 mm 粉黏粒团聚体含量与该粒级有机碳含量呈现极显著负相关($p < 0.01$);说明 <0.053 mm 粉黏粒团聚体含量与自身的有机碳的增加逐渐减少,同时大团聚体的重量会逐渐增加。



注: * 表示显著性水平为 $p < 0.05$, ** 表示显著性水平为 $p < 0.01$, *** 表示显著性水平为 $p < 0.001$ 。m 为团聚体, C 为有机碳。下同。

图 4 土壤团聚体稳定性的相关分析

Fig.4 Correlation analysis of soil agglomerate stability

由图 5 可知,各粒级团聚体的有机碳含量与 SOC、全氮、全磷、碱解氮、有效磷为极显著正相关 ($p < 0.01$)。各粒级的团聚体有机碳含量与全钾为极显著负相关 ($p < 0.01$);与速效钾、缓效钾、pH 值没有明显的相关性。土壤稳定性指标 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 与全磷、碱解氮、有效磷均为极显著正相关 ($p < 0.01$);与全钾表现为极显著负相关 ($p < 0.01$)。土壤可蚀性 K 值、分形维数 (D) 与全氮、全磷、碱解氮、有效磷为极显著负相关 ($p < 0.01$);与全钾为极显著正相关 ($p < 0.01$)。GMD 与全氮为极显著正相关 ($p < 0.01$)。MWD 与速效钾为极显著正相关 ($p < 0.01$)。综上所述,氮、磷元素有助于冰糖橙种植园有机碳的累积与土壤稳定性;结构稳定的冰糖橙土壤内钾元素的累积减少,随水体流失。 $R_{0.25}$, GMD, MWD、 > 2 mm 大团聚体含量、 < 0.053 mm 粉黏粒团聚体的有机碳含量与纬度、海拔为极显著正相关 ($p < 0.01$);与经度极显著负相关 ($p < 0.01$)。土壤可蚀性 K 值、分形维数 (D), $1.5 \sim 1$, $0.25 \sim 1$, $0.053 \sim 0.25$, < 0.053 mm 的团聚体含量与纬度、海拔均为极显著负相关 ($p < 0.01$);与经度为极显著正相关 ($p < 0.01$)。经度与纬度、海拔对于土壤团聚体的作用效果完全相反,可能受不同气候的影响。MWD, GMD, $R_{0.25}$ 与种植年限为极显著正相关 ($p < 0.01$)。土壤可蚀性 K 值和分形维数 (D)

与种植年限为极显著负相关 ($p < 0.01$)。 > 2 mm 大团聚体含量与种植年限为极显著正相关 ($p < 0.01$)。 $0.5 \sim 1$, $0.053 \sim 0.25$, < 0.053 mm 粒级的团聚体含量与种植年限为显著负相关 ($p < 0.05$)。土壤各粒级团聚体的有机碳含量与种植年限为显著或极显著正相关 ($p < 0.05$, $p < 0.01$)。

3 讨论

土壤团聚体的稳定性的指示中,包括 $R_{0.25}$ (≥ 0.25 mm);平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是评价土壤团聚体特征及稳定性的常用方法^[19]。本试验中平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GWD)与 > 0.25 mm 大团聚体呈极显著强正相关 ($p < 0.01$),且 4 种母质发育土壤中 > 0.25 mm 大团聚体含量在 78% 以上,因此 > 0.25 mm 大团聚体在冰糖橙土壤起主要的稳定性作用。一般土壤颗粒分形维数 (D) 越小,说明土壤结构稳定性越好,抵抗侵蚀的能力越强^[20];本研究中各母质发育的冰糖橙土壤分形维数 (D) 在 2.43~2.48 之间,处在同一水平;比伍家辉等^[21]人研究中种植核桃幼林得出的分形维数 D 值(2.539~2.656)偏小;同时也比其他学者研究结构良好的土壤分形维数 2.75^[22]偏小;比陈海^[23]对低黏粒、高砂粒、高粉粒的喀斯特地区研究得出的土

壤分形维数(1.80~2.20)偏大。冰糖橙土壤母质中板页岩、砂岩、紫色砂岩风化物形成的土壤砂粒成分较高,由于砂粒含量越高,分形维数也会越低^[24]。因此 D 值说明 4 种成土母质发育的土壤结构稳定性基本

相同,但是稳定性并不是处于最理想状态,主要受砂粒含量较高影响;可以通过添加其他有机物质,降低砂粒所占比重,增大土壤团聚体颗粒的分形维数,提升稳定性。

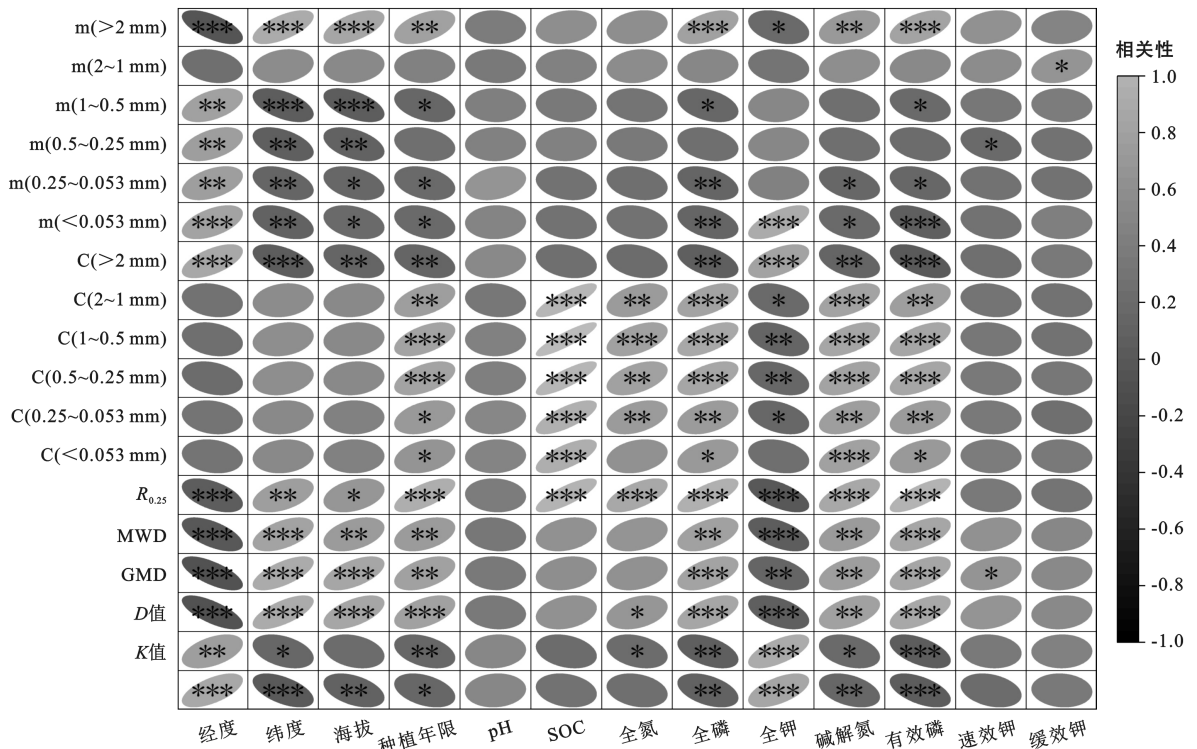


图 5 团聚体与理化指标、地理条件、种植年限的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of agglomerates with physicochemical indicators, geographic conditions and cropping history

前人的研究中土壤稳定性会受到成土母质的作用;但在本研究中不同母质发育的土壤几何平均直径(GWD)、分形维数(D)、土壤可蚀性 K 值均没有显著差异;可能是在共同作用下,母质对于土壤稳定性的影响被减弱了。其中耕作方式可以物理上直接对团聚体产生的影响。少翻耕,人为扰动较少,对其土壤结构破坏小,利于大团聚体形成^[25],按周期动态的发育,易于达到平衡状态。刘文景等^[26]对 5 种不同土地利用方式土壤为研究对象,柏树林、石坎农田、撂荒地和天然林土壤团聚体以 >2 mm 为优势粒级,蔬菜地以 <0.25 mm 微粒径团聚体为主,林地土壤稳定性和抗蚀性要优于农用地。冰糖橙种植土壤上除施肥过程外,很少有人为扰动来破碎土壤大团聚体,维持了大团聚体内有机质分解矿化并向微团聚体转移的过程,保持了土壤团聚体结构的稳定性。

土壤团聚体的形成与胶结物质有关^[27],有机胶结物质在团聚体黏结过程,特别是大团聚体形成过程中发挥主要作用。本研究中的冰糖橙土壤平均每株每年都会施加 2~5 kg 有机肥作为有机质来源的补

充;而研究显示土壤总有机碳与大团聚体含碳量极显著正相关($p < 0.01$),表明冰糖橙土壤新输入的有机质 SOC 主要积累在大团聚体内部,土壤总有机碳的增量主要来源于大团聚体内部有机碳的增加;研究中大团聚体有机碳贡献率占 82%~87%。与 Kong 等^[28]的研究结果,大团聚体(0.25~2 mm)数量与 SOC 输入量显著正相关,且包被于大团聚体内部的微团聚体和粗 POM 含量与 SOC 输入量也存在正相关关系的研究一致。

同时随着冰糖橙种植年限延长,长期施加有机肥后,本研究中土壤各粒级的有机碳含量不断增加,特别是 >2 mm 大团聚体含量与大团聚体内的碳含量显著增加($p < 0.01$),种植 40 a 后分别提升 97.35%与 51.44%;但微团聚体含量会显著减少($p < 0.01$),40 a 种植时间后减少了 40.70%。说明冰糖橙土壤中有有机胶结物质不断积累,能够促进微团聚体向大团聚转化,导致大团聚体含量增加。这与高会议^[29]的试验结果相一致,长期施肥提高了 >2 mm 粒级水稳性团聚体含量。表层土壤中大团聚体重量百分含量增

加,而微团聚体和粉黏粒团聚体下降^[30]。本研究中 <0.053 mm的粉黏粒团聚体有机碳含量不断增加,但该粒径的团聚体含量不断减少的特征也验证了该观点。冰糖橙种植园长期施加有机肥会提升有机胶结物质来增加土壤稳定性。

土壤的有机质含量的高低是由有机质输入速率与分解速率共同决定的,根据Six团聚体的动态理论^[31]和农田生态系统中微生物固碳的概念性模型^[32]土壤中的有机质分解矿化过程中,微生物占90%的作用,而在转化分解过程中,受到温度等环境影响。李丹丹^[33]研究表明温度升高能加快不同海拔梯度土壤碳矿化速率。土壤温度受到纬度与海拔影响。纬度、海拔与土壤团聚体有机碳的相关性分析中, <0.053 mm粉黏粒的有机碳、土壤总有机碳、大团聚体的有机碳贡献率与纬度、海拔之间有显著正相关($p<0.05$);说明在随着纬度的增加、海拔的升高,温度下降,土壤中酶活性降低,微生物作用减弱,有机质分解速率下降,从而使得土壤有机碳累积^[34]。特别是在 <0.053 mm粒级上形成有机碳的陡增,比 $0.053\sim 0.25$ mm粒级增加了69.67%;生成更多存在物理闭塞性质的微团聚体,促进了该粒级的微团聚体再经过有机酸、有机物质、根系、菌丝共同作用,黏合成大团聚体,形成良好的土壤团粒结构。同吴梦瑶等^[35]研究中,随海拔升高贺兰山主要土壤团聚体由微团聚体($0.25\sim 0.053$ mm)转变为大团聚体(>0.25 mm),各粒级团聚体有机碳、全氮含量和储量随海拔升高呈增大趋势的结果一致。因此土壤团聚体有机碳含量随种植区域内的海拔升高、纬度增加,土壤稳定性相对更强。

本研究中,土壤氮、磷元素含量与团聚体有机碳含量同向增加($p<0.01$),而钾元素含量会随团聚体有机碳含量增加而减少($p<0.01$)。团聚体分形维数(D)与土壤有机质和全氮含量均呈极显著负相关关系,与土壤全钾含量呈显著正相关关系,而与土壤全磷含量之间不存在相关关系^[36]。4种母质发育的土壤C/N比在7.7~16.2之间,低于理想C/N比(20~25:1),土壤中的有机质矿化分解比较快,不利于土壤有机胶结物质的累积;虽然通过增施氮元素来保证冰糖橙的生长,但是在氮肥的基础上应该施加相对更多的有机肥,维持较高碳氮比保证土壤团聚体稳定性以及冰糖橙的正常生长。同时冰糖橙种植园的土壤需要施加更多的钾肥,少量多次来提供冰糖橙生长所需的营养成分。

4 结论

(1) 冰糖橙种植园土壤的团聚体含量以大团聚

体为主, $R_{0.25}$ 所占比例大于78%,大团聚体在团聚体中发挥主要稳定性作用。4种母质发育的土壤团聚体的MWD,GMD,分形维数(D)与土壤可蚀性 K 值均无显著差异,说明研究区内团聚体稳定性处于同一水平。缺少人为扰动来直接破坏团聚体,土壤结构稳定性较强,但是受母质砂粒含量较高的影响,还未处于理想水平。

(2) 冰糖橙种植园土壤有机碳含量随粒径增大大有先减小后增大的趋势,呈V形分布。 $0.053\sim 0.25$ mm微团聚体有机碳含量最低。受长期施加有机肥作用和物理闭塞的影响, <0.053 mm粉黏粒团聚体的有机碳含量出现陡增。同时 <0.053 mm粉黏粒团聚体有机碳含量与团聚体含量、团聚体的稳定性具有极显著相关性,增加该粒径的有机碳含量可提升团聚体的稳定性。团聚体粒径越大,有机碳贡献率越大。

(3) 冰糖橙种植园土壤大团聚体含量常年受到外源有机碳输入影响,有机碳在各级团聚体中均出现累积;可以继续增施有机肥提升土壤稳定性。同时种植区土壤C/N比偏低,在施加氮肥时应进一步提升有机肥的施加比例。种植范围内纬度与海拔更高的地区微生物作用受到温度降低的影响,有机碳矿化速率变缓慢;有利于团聚体结构的发展。

[参 考 文 献]

- [1] 林哲,黄智刚,邓羽松,等.花岗岩侵蚀劣地不同种植年限果园土壤团聚体的稳定性[J].水土保持通报,2021,41(4):69-76.
- [2] 马境菲.长期施肥和成土母质对红壤有机碳稳定性的影响[D].江苏南京:南京信息工程大学,2011.
- [3] 冷暖,邓羽松,林立文,等.南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性[J].水土保持学报,2021,35(5):80-86,93.
- [4] 章明奎,何振立.成土母质对土壤团聚体形成的影响[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(3):198-202.
- [5] 毛霞丽.亚热带不同母质发育土壤有机碳的积累特征及其稳定机理研究[D].浙江杭州:浙江大学,2020.
- [6] 邬奇峰,谢国雄,王京文,等.浙西3类石灰岩发育土壤有机碳和团聚体稳定性的研究[J].土壤通报,2018,49(3):567-574.
- [7] 谷忠元.湘东地区典型土壤团聚体分布特征及其稳定性影响因素分析[D].湖南长沙:湖南农业大学,2019.
- [8] 李强,李志伟,王全,等.云南陆良植烟土壤粒径分布及其分形维数空间变异研究[J].山地学报,2017,35(1):23-31.
- [9] 刘杰,马艳婷,王宪玲,等.渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2019,40(7):3361-3368.

- [10] 奎国秀, 祁春节. 我国柑橘产业生产贸易的变化及机遇与挑战[J]. 中国果树, 2021(6): 93-97.
- [11] 周奕廷, 周卫军, 黄兰, 等. 永兴县冰糖橙果园土壤肥力特征及其综合评价[J]. 中国南方果树, 2019, 48(3): 27-33.
- [12] 朱凯, 马茂华, 李文娟, 等. 三峡水库消落带不同土地利用对土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1503-1513.
- [13] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1619-1625.
- [14] 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.
- [15] 张振国. 土壤抗侵蚀指标的建立及初步应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [16] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 129-135.
- [17] 王心怡, 周聪, 冯文瀚, 等. 不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 126-131.
- [18] 韩笑, 余冬立, 王洪德, 等. 滨海土壤团聚体分布和分形维数及其影响因子研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- [19] 冯文瀚, 李金彪, 周聪, 等. 不同林龄鹅掌楸人工林土壤团聚体及其有机碳状况[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(2): 133-141.
- [20] 陈海, 朱大运, 陈浒. 石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 346-354.
- [21] 伍家辉, 罗永飞, 龚伟, 等. 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[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 69-76.
- [22] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇, 等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 92-94.
- [23] 陈海. 喀斯特石漠化综合治理区土壤颗粒分形及团聚体稳定性研究[D]. 贵州 贵阳: 贵州师范大学, 2019.
- [24] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 154-159.
- [25] 刘瑞. 长期种植苎麻土壤的固碳效应与机制[D]. 湖南长沙: 湖南师范大学, 2020.
- [26] 刘文景, 许文年, 夏露, 等. 鄂西长江小流域土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(4): 925-935.
- [27] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 117-122.
- [28] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1078-1085.
- [29] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 931-938.
- [30] 孙利鹏. 子午岭天然辽东栎群落恢复影响土壤性质的过程和机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [31] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [32] Six J, Frey S D, Thiet R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 555-569.
- [33] 李丹丹. 北方温带森林不同海拔梯度土壤有机质分解酶活性及动力学特征研究[D]. 辽宁 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [34] 刘瑞, 夏卫生, 梁羽石, 等. 湖南省衡山不同海拔高度土壤的入渗特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 82-88.
- [35] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔土壤团聚体碳氮磷含量及其化学计量特征变化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1241-1249.
- [36] 王蕊. 壤土剖面土壤团聚体有机碳及养分状况研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.