

耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响

何绍浪¹, 黄尚书¹, 钟义军^{1,2}, 黄欠如¹,
成艳红¹, 张 昆¹, 武 琳¹, 李小飞¹, 叶 川³

(1.江西省红壤研究所, 南昌 330046; 2.华中农业大学
资源与环境学院, 武汉 430070; 3.江西省蚕桑茶叶研究所, 南昌 330202)

摘 要:为探讨耕作深度对第四纪红黏土土壤水稳性团聚体特征的影响,本研究依托 2015 年设置的红壤坡耕地合理耕作深度定位试验,试验设置免耕(NT)、翻耕 10 cm(P_{10})、翻耕 20 cm(P_{20})和翻耕 30 cm(P_{30})共 4 种试验处理,利用湿筛法测定了土壤 2~8 mm、0.25~2 mm、0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒径的团聚体的百分含量,并计算了 >0.25 mm 水稳性团聚体的百分含量($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GWD)和分形维数(D)。结果表明:4 种试验处理下土壤团聚体含量均以 0.25~2 mm 粒径最高,其次是 0.053~0.25 mm 粒径。与 NT 相比,2~8 mm 粒径的土壤团聚体含量在 P_{10} 、 P_{20} 和 P_{30} 处理下均显著下降($p<0.05$),微团聚体(<0.25 mm)含量在 P_{10} 和 P_{30} 处理下在整体上呈上升趋势,而微团聚体(<0.25 mm)含量在 P_{20} 处理下变化较小。土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 值在 NT 和 P_{20} 处理下整体上高于 P_{10} 和 P_{30} 处理,且土壤团聚体的 D 值在 NT 和 P_{20} 处理下低于 P_{10} 和 P_{30} 处理,表明 NT 和 P_{20} 处理的土壤性团聚体稳定性比 P_{10} 和 P_{30} 处理更好。此外,耕作扰动下(P_{10} 、 P_{20} 、 P_{30})花生产量与 0.25~2 mm 粒径的土壤团聚体含量呈极显著正相关($p<0.01$),与土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GMD 值呈显著正相关($p<0.05$),表明红壤坡耕地 0.25~2 mm 粒径的土壤水稳性团聚体含量能为土壤肥力的表征提供物理性诊断指标,而土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GMD 值一定程度上能反映土壤肥力的水平。

关键词:耕作深度;红壤坡耕地;水稳性团聚体;团聚体稳定性

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0127-06

Effects of Tillage Depth on the Characteristics of Soil Water-Stable Aggregates in Sloping Farmland of Red Soil

HE Shaolang¹, HUANG Shangshu¹, ZHONG Yijun^{1,2}, HUANG Qianru¹,
CHENG Yanhong¹, ZHANG Kun¹, WU Lin¹, LI Xiaofei¹, YE Chuan³

(1.Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 330046, China;

2.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University,

Wuhan 430070, China; 3.Jiangxi Sericulture and Tea Research Institute, Nanchang 330202, China)

Abstract: In order to investigate the effects of tillage depth on the characteristics of water-stable aggregates of Quaternary red clay soil, the positioning field experiment was conducted from 2015 to 2017. The experiment was designed into four treatments, including no-tillage (NT), tillage 10 cm (P_{10}), tillage 20 cm (P_{20}) and tillage 30 cm (P_{30}). Soil samples were collected from the 0~15 cm and 15~30 cm soil layers of the plots of the four treatments, proportions of the aggregate sizes of 2~8 mm, 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm and <0.053 mm were determined by using the wet screening method. The amount of >0.25 mm aggregate ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), mean geometric diameter (GMD) and fractal dimension (D) of the fractions of soil aggregates were calculated, respectively. The results showed that the content of soil aggregate of 0.25~2 mm particle was the highest under the all experimental treatments, followed by the size of 0.053~0.25 mm; compared to NT, the content of soil aggregate of >2 mm decreased significantly under the treatments of P_{10} , P_{20} and P_{30} ($p<0.05$), and the content of microaggregate (<0.25 mm) increased under the treatments of P_{10} and P_{30} as a whole; the microaggregate (<0.25 mm) content changed little under P_{20} .

收稿日期:2019-03-27

修回日期:2019-04-08

资助项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503119);江西省重点研发计划项目(20161BBF60105)

第一作者:何绍浪(1990—),男,江西兴国人,助理研究员,硕士,主要从事土壤生态研究。E-mail:heshao1ang@sina.com

通信作者:叶川(1965—),男,江西定南人,研究员,硕士,主要从事生态环境研究。E-mail:yechuan555@sohu.com

treatment. The values of $R_{0.25}$, MWD, and GMD of the aggregates under NT and P_{20} treatments were higher than those of P_{10} and P_{30} , and values of D of soil aggregates under NT and P_{20} treatments were lower than those of P_{10} and P_{30} . It was indicated that the stability of soil aggregates under NT and P_{20} treatment were more stable than P_{10} and P_{30} treatments. In addition, the peanut yield was significantly positively correlated with the content of soil aggregate of 0.25~2 mm under the treatment of P_{10} , P_{20} and P_{30} ($p < 0.01$), and was significantly positively correlated with the values of $R_{0.25}$ and GMD of the aggregates ($p < 0.05$). It could thus be concluded that the content of soil water-stable aggregate of 0.25~2 mm could be used as the physical indicator to evaluate fertility of red soil sloping field, and the values of $R_{0.25}$ and GMD of the aggregates could well indicate the soil fertility.

Keywords: tillage depth; sloping farmland of red soil; soil water-stable aggregate; aggregates stability

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其数量和质量在保证和协调土壤中水肥气热、供应及转化土壤营养元素、维持和稳定土壤疏松熟化层等方面都发挥重要作用^[1-2]。而稳定的土壤团聚结构对种子发芽、根系发育、作物生长以及有机碳保护有着重要的影响^[3-4]。近年来,众多学者在耕作方式^[3,5]、施肥^[6]、秸秆还田^[7]、生物炭还田^[8]、土地利用方式^[9-10]、种植年限^[11-12]等对土壤团聚体的影响方面也开展了大量的研究,同时也取得了丰硕的成果。因此,探讨水稳性团聚体分布特征对土壤肥力、耕地质量提升和耕地的可持续高效利用等方面具有重要理论指导意义。

红壤坡耕地占南方红壤区旱地面积的70%左右,是我国经济作物及粮食作物的重要基地。丰富的水热资源使得南方红壤区农业生产和经济发展存在巨大的潜力,在我国农业可持续发展中发挥着重要作用^[13-14]。目前,红壤坡耕地由于立地条件原因,农民习惯于采用旋耕与浅翻耕相结合的作业方式,但由于耕作机具动力不足,难以保证耕作深度,使红壤坡耕地作物生长有效耕层浅薄化问题突出,耕层土壤的蓄水保墒能力严重不足,加重了红壤坡耕地的水土流失以及耕地质量下降等生产障碍,导致作物产量低而不稳^[15]。近年来,随主要农作物生产全程机械化推进行动深入开展,主要粮食产地耕地效率及耕作深度得到极大保证,但关于红壤坡耕地合理耕作深度的研究较少。为此,江西省红壤研究所于2015年设置了红壤坡耕地耕作深度定位试验。本研究则是通过分析耕作深度对第四纪红壤土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响,旨在从土壤物理角度为红壤坡耕地合理耕层构建提供科学理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究试验地点位于距离江西省红壤研究所10 km的温圳茶厂(116°08'4.8"E, 28°19'29.7"N)附近,该区属于典型的低山丘陵区,坡度5°,海拔25~

30 m。气候类型为中亚热带季风气候,年均降雨量1 537 mm,年蒸发量1 100~1 200 mm,年均气温17.7~18.5℃,最冷月(1月)平均气温为4.6℃,最热月(7月)平均气温28.0~29.8℃。土壤类型为第四纪红黏土母质发育的红壤。

1.2 试验设计

试验于2015年开始,选取基础肥力、地形条件一致的红壤坡耕地作为试验地,设置免耕(NT)、机械翻耕10 cm(P_{10})、机械翻耕20 cm(P_{20})、机械翻耕30 cm(P_{30})共4种处理,每种处理重复4次,共计16个试验小区,小区面积为88 m²(22 m×4 m),试验地四周为保护行。试验小区种植方式为花生(粤油933)/红薯(苏薯8号)周年轮作,一年种植一季。花生和红薯种植的施肥量相一致,各处理化肥施用量均为当地常规施肥水平(总氮118.3 kg/hm²、P₂O₅45 kg/hm²、K₂O180 kg/hm²),并按基追比7:3施肥,花生追肥在苗期始花前进行,而红薯追肥在茎叶生长期进行,且各处理增施石灰2 250 kg/hm²。2017年为连续耕作的第3年,种植作物为花生,种植密度为33 cm×15 cm。播种时间为2017年4月10日,收获时间为2017年8月15日。

1.3 样品采集与测定

在花生收获前(2017年8月7日),取各小区0—15 cm和15—30 cm原状土,沿土壤自然断裂面将土样掰开,过8 mm筛,并除去植物残体、可见根系及石块后,采用湿筛法对土壤水稳性团聚体进行测定^[2]。大致步骤为:取4份约150 g鲜土样放置于孔径自上而下为2, 0.25, 0.053 mm套筛的顶层筛上,将套筛置于水桶中加水浸润过夜,然后通过TTF-10型土壤团聚体分析仪的上下振动使样品震荡过筛(振幅3 cm,频率50次/min),然后收集各级网筛上以及桶中的团聚体于铝盒中,共可筛分出>2 mm, 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm, <0.053 mm共4种粒级水稳性团聚体,在105℃下烘干,分别称重。将>0.25 mm的

团聚体称为大团聚体, <0.25 mm 的团聚体称为微团聚体^[1]。

本研究采用各粒级水稳性团聚体含量、粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体的百分含量($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GWD)和分形维数(D)等指标描述团聚体特征。其中 $R_{0.25}$, MWD 和 GWD 的计算公式如下^[16]:

$$R_{0.25} = \frac{M_{i>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{x_i} w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$\text{GWD} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln \overline{x_i})}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (3)$$

式中: $M_{i>0.25}$ 为大于 0.25 mm 团聚体的重量; M_T 为团聚体的总重量; w_i 为各粒级颗粒的重量百分比; $\overline{x_i}$ 为各粒级的平均直径。

分形维数(D)采用 Katz 等^[17]的公式表示, 具体见公式(4), 由该公式可以推导出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式^[18], 见公式(5):

$$V(\delta > d_i) = A \left[1 - \left(\frac{d_i}{k} \right)^{3-D} \right] \quad (4)$$

$$\left(\frac{\overline{d_i}}{\overline{d_{\max}}} \right)^{3-D} = 1 - \frac{W(\delta > \overline{d_i})}{W_0} \quad (5)$$

式中: d_i 为表示两筛分粒级间的平均值; d_{\max} 表示最大粒级; $W(\delta > d_i)$ 表示粒级大于 d_i 的重量。对公式(5) 进行两边取对数后 $\lg \left(\frac{\overline{d_i}}{\overline{d_{\max}}} \right)$ 和 $\lg \left(1 - \frac{W(\delta > \overline{d_i})}{W_0} \right)$ 进行线性回归分析, 即可求出分形维数 D 的值。

1.4 数据分析

本研究中所有数据采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行计算和统计分析, 用 Origin 9.0 软件作图。不同处理间各指标的差异性检验采用单因素统计分析中多重比较法(LSD)。

2 结果与分析

2.1 不同耕作深度对土壤水稳性团聚体数量的影响

从图 1 可以看出, 与 NT 为对照, 0—15 cm 土层中 P_{10} , P_{20} 和 P_{30} 处理下 2~8 mm 粒径的团聚体含量均显著减少($p < 0.05$), P_{10} 和 P_{30} 处理下 0.25~2 mm 粒径的团聚体含量均显著减少($p < 0.05$), P_{10} , P_{20} 和 P_{30} 处理下 0.053~0.25 mm 粒径的团聚体含量均显著增加($p < 0.05$), P_{30} 处理下 <0.053 mm 粒径的团聚体含量显著增加($p < 0.05$); 而 15—30 cm 土层中,

P_{10} , P_{20} 和 P_{30} 处理下 2~8 mm 粒径的团聚体含量均显著减少($p < 0.05$), P_{20} 处理下 0.25~2 mm 粒径的团聚体含量显著增加($p < 0.05$), P_{10} , P_{20} 和 P_{30} 处理下 0.053~0.25 mm 粒径的团聚体含量均无显著差异, P_{10} 和 P_{30} 处理下 <0.053 mm 粒径的团聚体含量显著增加($p < 0.05$)。

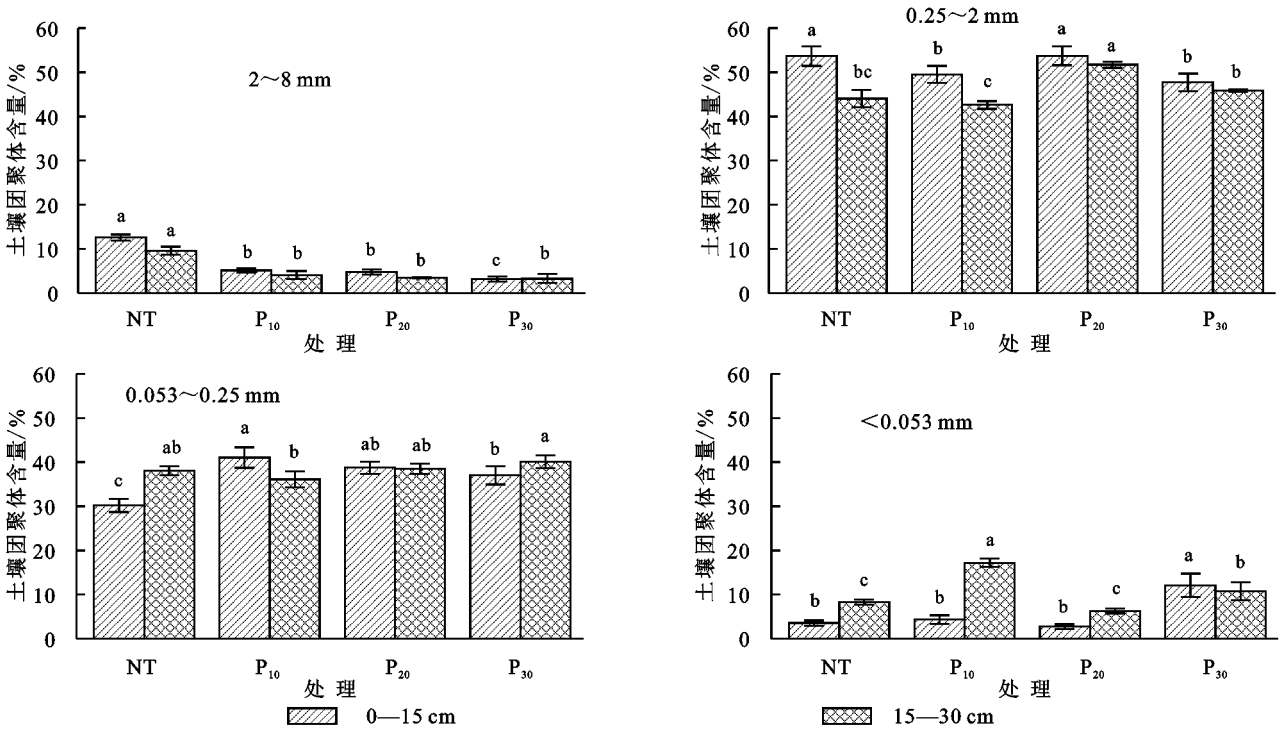
整体上, 4 种处理下土壤团聚体含量均以 0.25~2 mm 粒径最高, 其次是 0.053~0.25 mm 粒径。 P_{10} 和 P_{30} 处理减小了大团聚体(>0.25 mm)含量而增加了微团聚体(<0.25 mm)含量, 而 P_{20} 处理减小了 2~8 mm 粒径的团聚体含量, 但对微团聚体的影响相对较小。

2.2 不同耕作深度对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

土壤水稳性团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GMD 和 D 等是反映土壤结构和土壤团聚体稳定性的重要指标。土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GMD 值越大或 D 值越小, 土壤团聚体越稳定, 土壤抗侵蚀能力越强^[6, 11, 19]。由表 1 可以看出, 0—15 mm 土层中 NT 处理下土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GWD 值均显著高于其他 3 种处理(P_{10} , P_{20} , P_{30}) ($p < 0.05$), 且土壤团聚体的 D 值显著高于 P_{20} 而低于 P_{30} 处理($p < 0.05$); P_{20} 处理下土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 值显著高于 P_{10} 和 P_{30} ($p < 0.05$), 土壤团聚体的 MWD, GWD 值显著高于 P_{30} 处理($p < 0.05$) 而与 P_{10} 无显著差异, 且土壤团聚体的 D 值在 4 种处理中最低。15—30 mm 土层中 NT 和 P_{20} 处理下土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GWD 值均显著高于 P_{30} 和 P_{10} 处理($p < 0.05$), 各处理下土壤团聚体的 MWD 值依次为 $NT > P_{20} > P_{30} > P_{10}$, 而土壤团聚体的 D 值依次为 $P_{20} > NT > P_{30} > P_{10}$ 。因此, 在整体上 NT 和 P_{20} 处理的土壤团聚体稳定性比 P_{10} 和 P_{30} 处理更好。

2.3 土壤水稳性团聚体组成、稳定性指标及花生产量的相关分析

表 2 为 4 种处理下各粒级土壤团聚体含量与土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GMD, D 值及花生产量(见黄尚书等^[20])之间的相关性。由表 2 可知, 土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD 和 GMD 值之间均呈极显著正相关($p < 0.01$), 且三者均与 2~8 mm, 0.25~2 mm 粒径的土壤团聚体含量呈极显著正相关($p < 0.01$), 而与 0.053~0.25 mm、<0.053 mm 粒径的土壤团聚体含量和土壤团聚体的 D 值呈极显著负相关($p < 0.01$)。同时, 土壤团聚体的 D 值与 0.25~2 mm 粒径的土壤团聚体含量呈极显著负相关($p < 0.01$), 而与 <0.053 mm 粒径的土壤团聚体含量呈显著正相关($p < 0.01$)。此外, 花生产量与 2~8 mm 粒径的土壤团聚体含量呈极显著负相关($p < 0.01$)。



注:不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同耕作深度下 0—15 cm 和 15—30 cm 土壤水稳性团聚体含量分布

表 1 不同耕作深度 0—15 cm 和 15—30 cm 土壤水稳性团聚体评价参数

处理	$R_{0.25}$		MWD		GWD		D	
	0—15 cm	15—30 cm	0—15 cm	15—30 cm	0—15 cm	15—30 cm	0—15 cm	15—30 cm
NT	66.26±1.92a	53.64±1.14a	0.90±0.02a	0.75±0.01a	0.59±0.03a	0.43±0.01a	2.15±0.04bc	2.38±0.02c
P ₁₀	54.64±2.39c	46.68±1.66c	0.72±0.03b	0.62±0.02c	0.44±0.02b	0.33±0.01c	2.23±0.03b	2.55±0.01a
P ₂₀	58.51±1.57b	55.18±0.61a	0.76±0.01b	0.71±0.00b	0.49±0.02b	0.43±0.00a	2.13±0.06c	2.31±0.02d
P ₃₀	50.88±2.05c	49.14±1.22b	0.66±0.02c	0.65±0.02c	0.37±0.02c	0.37±0.02b	2.46±0.05a	2.44±0.04b

注:不同字母表示处理之间差异显著($p<0.05$)。

表 2 各粒级水稳性团聚体含量与 $R_{0.25}$, MWD, GMD, D 值及花生产量的相关性 ($n=24$)

指标	2~8 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D	产量
2~8 mm	1								
0.25~2 mm	0.2	1							
0.053~0.25 mm	-0.63**	-0.31	1						
<0.053 mm	-0.42*	-0.80**	-0.01	1					
$R_{0.25}$	0.71**	0.83**	-0.58**	-0.81**	1				
MWD	0.85**	0.68**	-0.61**	-0.76**	0.97**	1			
GMD	0.74**	0.80**	-0.53**	-0.84**	0.99**	0.98**	1		
D	-0.36	-0.76**	0.17	0.80**	-0.75**	-0.69**	-0.77**	1	
产量	-0.74**	0.34	0.40	-0.07	-0.17	-0.37	-0.21	0.01	1

注:*, ** 分别表示 $p<0.05$, $p<0.01$ 水平显著性差异(下同)。

由于免耕条件下一方面花生成活率有所下降,另一方面土壤容重增加不利于根系正常生长发育,从而导致产量明显减小^[21]。这一定程度上会影响各粒级土壤团聚体含量和土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GMD, D 值与花生产量的相关分析。表 3 为耕作扰

动下(P₁₀, P₂₀, P₃₀)土壤水稳性团聚体组成、稳定性指标及花生产量的相关性。从表 3 可知,花生产量与 0.25~2 mm 粒径的土壤团聚体含量呈极显著正相关($p<0.01$),与土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GMD 值呈显著正相关($p<0.05$)。

表 3 耕作扰动下各粒级水稳性团聚体含量和 $R_{0.25}$, MWD, GMD, D 值与花生产量的相关性 ($n=18$)

指标	2~8 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D
产量	-0.34	0.63**	0.00	-0.41	0.50*	0.40	0.46*	-0.17

3 讨论

本试验研究经三年后,由于不同处理对土壤的耕作深度、扰动程度等方面的差异,造成各处理之间的土壤水稳定团聚体特征存在一定差异。尤其对 2~8 mm 粒径的团聚体含量影响较为明显,与 NT 相比均显著下降($p < 0.05$)。这与 Sodhi 等^[22]研究发现耕作后土壤大团聚体更容易破裂,耕作优先降低了 2~8 mm 团聚体含量的结果相一致。本研究中 P_{10} 和 P_{30} 处理下 2~8 mm 粒径的团聚体含量减小的同时微团聚体(< 0.25 mm)含量在整体上呈上升趋势。这可能是水稳性大团聚体是由微团聚体和各种黏合剂胶结而成,当土壤在耕翻作用下水稳性大团聚体遭受破裂,释放出原先被大团聚体包裹的新及老的微团聚体后,微团聚体数量就会相应增加^[23]。此外, P_{10} 处理下 15—30 cm 土层可能会受到耕犁的压实以及 0—15 cm 土壤黏粒向下淋溶而沉积,甚至是土壤型底层上移,使得 15—30 cm 土层微团聚体增加。 P_{30} 处理则对 20—30 cm 的土壤扰动强烈,20—30 cm 的土壤位于犁底层之下,由于长期受耕犁、机械挤压,黏粒下移,较紧实,粘重,使得微团聚体含量增加。而 P_{20} 处理下微团聚体含量在整体上变化较小,可能是 P_{20} 处理有利于新的大团聚体的形成,从而使得微团聚体变化较小。这具体的原因有待于深入研究。

本研究中 NT 和 P_{20} 处理的土壤水稳定团聚体稳定性比 P_{10} 和 P_{30} 处理更好,其中,NT 处理下土壤团聚体稳定性好,这与田慎重等^[3]、梁爱珍等^[23] 研究结果相似。究其原因,可能是免耕处理不翻动土壤,土壤大团聚体周转较慢,有利于大团聚体中更多微团聚体的产生,更有利于增加土壤团聚体稳定性^[3]。而 P_{20} 处理下土壤团聚体稳定性好,一方面是 P_{20} 处理下花生根系生长及活力较好^[20],而根系可以作为暂时的土壤团聚体粘结介质,有利于大团聚体的恢复^[24]。另一方面可能是由于 P_{20} 耕作下土壤中有机质整体上得到提高,而有机质是土壤团聚体胶结物质,有利于提高水稳性团聚体的稳定性^[23]。

表 2 也体现了土壤团聚体的各特征值与土壤各粒径团聚体含量间存在极显著相关关系,这与黄欠如等^[6]、安婉丽等^[17] 的研究结果相一致。这也表明土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GMD 和 D 值均是各粒径土壤团聚体含量的综合反映,某一粒径团聚体的变化对土壤团聚体的特征都可能产生重要影响。耕作扰动下(P_{10} , P_{20} , P_{30}) 花生产量与 0.25~2 mm 粒径的土壤团聚体含量表现出极显著的线性关系,表明红壤坡耕地 0.25~2 mm 粒径的土壤水稳性团聚体含量能为土壤肥力的表征提供物理性诊断指标;而花生产

量与土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GMD 值表现出显著的线性关系,这一定程度上说明土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GMD 值均可以反映土壤肥力的水平。

综合考虑土壤水稳性团聚体稳定性和作物产量,红壤坡耕地耕作深度为 20 cm 比较合适。当然,红壤坡耕地合理耕层的构建还应结合坡耕地区位、剖面形状、理化形状土壤管理等多因素作进一步研究。

4 结论

(1) 红壤坡耕地经过 3 a 的花生/红薯周年轮作后,NT, P_{10} , P_{20} 和 P_{30} 共 4 种试验处理下土壤团聚体含量均以 0.25~2 mm 粒径最高,其次是 0.053~0.25 mm 粒径。 P_{10} , P_{20} , P_{30} 处理均减小 2~8 mm 粒径的土壤团聚体含量, P_{10} 和 P_{30} 处理会增加微团聚体(< 0.25 mm)含量,而 P_{20} 处理对微团聚体的影响较小。

(2) 土壤团聚体的 $R_{0.25}$, MWD, GMD 和 D 值均是各粒径土壤团聚体含量的综合反映,某一粒径团聚体的变化对土壤团聚体的特征都可能产生重要影响。NT 和 P_{20} 处理下土壤团聚体稳定性比 P_{10} 和 P_{30} 处理更好。

(3) 相关分析表明,红壤坡耕地 0.25~2 mm 粒径的土壤团聚体含量以及土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 和 GMD 值的提高有助于作物产量形成。该结果可为红壤坡耕地土壤结构改良、合理耕层构建提供重要科学理论支撑。

参考文献:

- [1] 王志强,刘英,杨文亨,等.稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].土壤学报,2018,55(5):1143-1155.
- [2] 成艳红,武琳,孙慧娟,等.稻草覆盖和香根草篱对红壤水稳性团聚体组成及有机碳含量的影响[J].生态学报,2016,36(12):3518-3524.
- [3] 田慎重,王瑜,李娜,等.耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(22):7116-7124.
- [4] 廖洪凯,龙健,李娟,等.花椒(*Zanthoxylum bungeamun*)种植对喀斯特山区土壤水稳性团聚体分布及有机碳周转的影响[J].生态学杂志,2015,34(1):106-113.
- [5] 张赛,王龙昌.保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):263-267.
- [6] 黄欠如,胡锋,袁颖红,等.长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响[J].土壤,2007,39(4):608-613.
- [7] 徐国鑫,王子芳,高明,等.秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J].环境科学,2018,39(1):355-362.
- [8] Liu Z, Chen X, Jing Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. Catena, 2014,123:45-51.
- [9] 韩新生,马璠,郭永忠,等.土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):

- 114-120.
- [10] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [11] 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.
- [12] 李玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):6326-6336.
- [13] 黄尚书,钟义军,叶川,等.深松与压实对红壤坡耕地土壤物理性质的影响[J].土壤通报,2017,48(6):1347-1353.
- [14] 刘志鹏,史东梅,金慧芳,等.红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J].中国土壤与肥料,2018(3):7-13.
- [15] 钟义军,黄欠如,武琳,等.水保措施对红壤旱地团聚体及其特性的影响[J].土壤通报,2014,45(4):961-965.
- [16] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [17] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985,54(12):1325-1328.
- [18] Turcotte D L. Fractals and Fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1986,91(B2):1921-1926.
- [19] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,12(3):27-28.
- [20] 黄尚书,武琳,叶川,等.耕作深度对红壤坡耕地花生根系生长及活力的影响[J].江西农业学报,2018,30(12):9-12.
- [21] 杨贺菲,赵静,张旭.免耕和稻草覆盖对红壤旱地土壤物理性质及玉米产量的影响[J].江西农业学报,2018,30(10):45-49.
- [22] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009,103(2):412-418.
- [23] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J].土壤学报,2009,46(1):154-158.
- [24] 张会慧,王世标,王均睿,等.三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J].生态学杂志,2019,38(6):1679-1687.

(上接第 119 页)

- [14] 高建恩,吴普特,牛文全,等.黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J].农业工程学报,2005(10):41-45.
- [15] 唐克丽,周佩华.黄土高原土壤侵蚀研究若干问题的讨论[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):1-4.
- [16] 宋丹丹.林冠对降雨截留作用的研究[D].山东泰安:山东农业大学,2015.
- [17] 王红.水土保持典型措施对地下水补给生态基流的影响研究[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),2014.
- [18] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effects of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Original Research Article Pedosphere, 2008,18(1):131-136.
- [19] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [20] 周秋文,李璇,郭兴房.喀斯特地区枯落物层对地表径流和土壤侵蚀的影响研究[J].水文,2018,38(4):19-24.

(上接第 126 页)

- [22] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(2):33-38.
- [23] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [24] 宋小燕.松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D].陕西杨凌:中国科学院水土保持研究所,2010.
- [25] Gao P, Geissen V, Ritsema C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2012,17(3):961-972.
- [26] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979,28(2):126-135.
- [27] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
- [28] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [29] 李伟珮,闫观清,李保国,等.黄河流域近 300 年来水文情势及其变化[J].人民黄河,2009,31(11):25-26.
- [30] 黄河水利科学研究院.黄河水沙变化趋势与水利枢纽工程建设对黄河健康的影响[R].郑州:黄河水利科学研究院,2007.