

DOI: 10.11766/trxb201902110023

王世佳, 蒋代华, 朱文国, 张蓉蓉, 李军伟, 韦本辉. 粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 326-335.
WANG Shijia, JIANG Daihua, ZHU Wenguo, ZHANG Rongrong, LI Junwei, WEI Benhui. Effect of Deep Vertical Rotary Tillage on Aggregate Structure in Farmland of Lateritic Red Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 326-335.

粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响*

王世佳¹, 蒋代华^{1†}, 朱文国¹, 张蓉蓉¹, 李军伟¹, 韦本辉²

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西农业科学院经济作物研究所, 南宁 530004)

摘要:为揭示粉垄耕作对土壤团聚体结构的影响, 探明其变化机理, 通过团粒分析、扫描电镜(SEM)、Brunauer-Emmett-Teller (BET) 比表面积及孔径分析等表征手段对赤红壤进行形貌和结构分析, 结合耕作后土壤养分的变化, 分析比较了常规旋耕(CT20)、深翻旋耕(DT40)、粉垄 20 cm (FL20) 和粉垄 40 cm (FL40) 四种耕作方式下赤红壤理化特性的变化。结果表明: FL40 相对其他耕作方式, 增加了 1~0.25 mm 粒径机械稳定性团聚体含量 ($P<0.05$), 减少了大于 3 mm 粒径水稳性团聚体含量 ($P<0.05$)。相对于 CT20 和 DT40, 粉垄耕作处理土壤微形态改变呈现出骨骼颗粒细小且排列紧密、表面光滑、土壤比表面积较大、孔隙分布更丰富等特点; DT40 速效养分含量较 CT20、FL20 和 FL40 均达到显著差异 ($P<0.05$)。相对于 CT20 和 DT40, 粉垄耕作能增加赤红壤的中团聚体含量, 使赤红壤形态特征存在明显差异; 其中, FL20 使作物增产显著。

关键词: 粉垄; 团聚体; 微形态; 孔隙分布; 土壤养分

中图分类号: S152 文献标志码: A

Effect of Deep Vertical Rotary Tillage on Aggregate Structure in Farmland of Lateritic Red Soil

WANG Shijia¹, JIANG Daihua^{1†}, ZHU Wenguo¹, ZHANG Rongrong¹, LI Junwei¹, WEI Benhui²

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Institute of Economic Crops of Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530004, China)

Abstract: 【Objective】 In order to expose influence of deep vertically rotary tillage (DVRT) technology on aggregate structure, and explore mechanism of the change, in-lab analyses of soil samples were carried out in this study. 【Method】 Soil samples were collected from farmlands of latosolic red soil different in tillage, conventional rotary tillage 20 cm deep (CT20), deep tilling 40 cm deep (DT40), DVRT 20 cm deep (FL20) or DVRT 40 cm deep (FL40), were studied by means of aggregate analysis, scanning electron microscopy (SEM), brunauer-emmett-teller (BET) specific surface area analysis and pore size analysis for differences in morphology and structure of the soil before and after tillage and between the treatments of tillage. Changes in nutrient status and physicochemical properties of the latosolic red soil after tillage were analyzed and compared. 【Result】 Results show that FL40

* 广西科技重大专项(桂科 AA17204037-3)资助 Supported by the Science and Technology Major Project of Guangxi Province in China (No. AA17204037-3)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dhjiang2008@gxu.edu.cn

作者简介: 王世佳(1993—), 男, 贵州息烽人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境生态研究。E-mail: 1490873154@qq.com

收稿日期: 2019-02-11; 收到修改稿日期: 2019-04-06; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-05-10

increased the content of mechanical stability aggregates, 1~0.25 mm in particle size ($P<0.05$) and decreased the content of water stability aggregates, >3 mm in particle size ($P<0.05$) as compared with other tillage methods. Compared with CT20 and DT40, FL (either FL20 or FL40) changed the soil in micro-morphology to have skeletal grains fine, closely arrayed and smooth in surface, and to be higher in soil specific surface area and more extensive in pore distribution. DT40 differed significantly from the other treatments in available nutrient content ($P<0.05$). 【 Conclusion 】 Compared with CT20 and DT40, FL (either FL20 or FL40) can increase the content of aggregates in latosolic red soil, and changed the micromorphology of latosolic red soil significantly, and FL20 can increase crop yield significantly.

Key words: Deep vertically rotary tillage; Aggregate; Micromorphology; Pore distribution; Soil nutrient

赤红壤区是我国主要的粮食和经济作物主产区之一，其中水稻播种面积占全国 90%以上^[1]，甘蔗产量占全国 60%以上^[2-3]，在全国粮食生产中占有重要地位。近年来，农业生产上对农产品产量和质量的要求不断提高，化肥、农药的投入水平又需得到有效控制^[4]；在稳定“化学农业”投入的同时，如何采取其他有效措施提升土壤肥力具有重大的现实意义。

研究^[5-8]表明，不同耕作方式对土壤理化性质影响不同，合理的耕作方式能有效改善土壤的水、肥、气、热条件，以物理的方式提升土壤肥力，从而达到作物增产提质的效果。赤红壤地区多采用铧式犁作为耕地工具进行深翻旋耕^[9]，虽然长期翻耕能有效除掉作物残茬、杂草并增加土壤的通气性等，但同时也破坏了对地面的保护，导致耕层变浅^[10]，土壤结构紧实，土壤蓄水保肥能力严重下降等问题^[11]。来自广西农业科学院韦本辉研究员发明的粉垄技术，是继人力、畜力、拖拉机耕作之后一种全新高效的耕作方式，其特点为立式螺旋型旋削刀具快速扰动土壤，悬浮成垄而不破坏土层，且能打破犁底层，以达到深耕深松的效果^[12]。据相关研究报道^[13]，粉垄耕作能使作物增产 10%~30%，品质提升 5%以上。2017 年以来，粉垄耕作被原农业部列为全国主推技术且评估达到国际领先水平，得到袁隆平院士、张洪程院士等专家学者的一致认可^[14-15]；目前，该技术已在全国 25 个省份、35 种作物上推广应用^[16]。因此，研究粉垄耕作对赤红壤理化特性的影响，具有重要的现实意义。

土壤团聚体分布及数量能直接表明土壤结构的抗蚀性和机械稳定性，王彩霞等^[17]研究表明，旋耕和覆盖深松相对于传统耕作能够增加小于 0.01 mm 粒级的微团聚体；而张祥彩等^[18]研究表明，深松能够明显增加土壤大团聚体含量；刘艳等^[19]指出了耕

作制度下土壤团聚体对干湿交替的响应；王恩姮等^[20]研究了自然条件下黑土微形态的变化状况；姜宇等^[21]则研究了冻融条件下黑土大孔隙结构特征；靳晓敏等^[22]研究了粉垄耕作对土壤养分的影响。这些研究未将不同耕作方式下土壤团聚体含量分布特征结合土壤形貌结构及微孔隙变化差异进行系统研究，其中，粉垄耕作对赤红壤理化性质的研究鲜有报道，特别是粉垄耕作对农田赤红壤团聚体含量及结构形态的影响研究未见报道。

因此，本研究从粉垄耕作技术对赤红壤形貌和结构分析角度出发，探讨粉垄耕作方式下赤红壤理化性质特征。以赤红壤为研究对象，采用一系列物理表征手段与化学实验分析相结合的方法，比较分析了常规旋耕 20 cm、粉垄 20 cm、粉垄 40 cm 和深翻旋耕 40 cm 四种耕作方式下赤红壤理化性质变化的特征，了解粉垄耕作对农业生产的重要作用，为赤红壤地区推广粉垄耕作技术提供理论依据和实践支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于广西壮族自治区南宁市隆安县那桐镇大滕村。隆安县位于广西的西南部，北回归线以南（22°99'N，107°88'E），岩溶山地地貌，石灰岩上覆盖第四纪红土，土壤类型为湿热铁铝亚纲的赤红壤。属南亚热带季风气候，年平均降水量 1 301 mm，年内降水量分配很不均匀，季节性较强，降水主要集中在 6—9 月，年均气温 21.8℃，多年平均最高月气温 28.4℃，最低月平均气温 13.2℃。

试验地为平地，无坡度；前茬作物为南瓜，过去常年土地利用方式为水稻田。土壤母质为第四纪

红土,肥力中等,土壤质地为粉质壤土。2018年试验地土壤全氮 $1.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $238.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $7.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有机质 $30.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 4.94, 容重 $1.16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

试验分为4个耕作处理,分别为常规旋耕 20 cm (CT20): 采用功率为 132 kW 拖拉机,耕作土层深度均为 20 cm; 粉垄 20 cm (FL20): 采用功率为 295 kW 粉垄机,耕作土层深度均为 20 cm; 粉垄 40 cm (FL40): 采用功率为 295 kW 粉垄机,耕作土层深度均为 40 cm; 深翻旋耕 40 cm (DT40): 先用功率为 132 kW 拖拉机对试验地先进行深翻,深度为 40 cm, 再进行常规旋耕,旋耕深度均为 20 cm。

试验于 2018 年 4 月进行,耕作在同一天完成,采用间隔重复设计,重复 4 次,即共 4 个区组,每个区组 4 个处理,随机排列,每个处理小区面积 90 m^2 (长 15 m, 宽 6 m)。耕作后即采集土样,后期供试作物为甘蔗,甘蔗品种: 桂糖 42 号。各处理按照当地常规习惯统一供试肥料用量及种类: 复合肥 N : P_2O_5 : K_2O 比例为 15 : 15 : 15, 尿素 (含 N $465 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 钾肥为氯化钾 (含 K_2O $600 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 甘蔗于 2019 年 1 月进行测产。

本试验均在每个小区采集表层土 (0~20 cm), 每个小区均采集 5 个土样, 均匀混合, 然后将大土块用手轻掰成直径约 1 cm 左右的小土块, 清除石块和动植物残体, 最后采用四分法收集约 1 kg 土壤, 置于干净的硬质塑料盒, 带回实验室风干备用。

1.3 土壤团聚体粒径测定

机械稳定性团聚体采用人工干筛法对团聚体进行分组。具体方法为: 将孔径分别为 3.0 mm、2.00 mm、1.00 mm、0.5 mm、0.25 mm 孔筛自上而下套合, 放在筛底上, 称取 100 g 左右的风干土置于 3 mm 孔筛, 加盖后人工手筛将土分为 6 个粒径组, 即大于 3 mm、3~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 和小于 0.25 mm。经筛分的各粒级团聚体分别准确称量, 计算得到各粒级团聚体质量百分比。

水稳性团聚体采用 Elliott 土壤团聚体湿筛法测定^[23]。具体方法为: 采用土壤团粒分析仪 (DM200-V, 德码信息技术有限公司, 上海), 称取风干土 100 g, 将土样置于 3 mm 孔径筛上, 自上而下放孔径 3.0 mm、2.00 mm、1.00 mm、0.5 mm、0.25 mm 孔筛, 再将整个套筛缓慢放入水中, 使水面淹过顶层筛, 土样在

水中浸泡 3 min, 竖直上下振荡 (上下振幅 38 mm, 每分钟 30 次), 分离出大于 3 mm、3~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 和小于 0.25 mm 土壤团聚体, 共 6 个粒径组, 收集各粒级团聚体转移至蒸发皿中, 在 105~108 °C 下烘 8 h 干燥后称重, 计算得到各粒级团聚体含量。

1.4 土壤微形态、比表面和孔隙度测定

采用扫描电子显微镜 (SEM, S-3400N, 日立公司, 日本) 观察并拍照。具体的方法为: 将带回风干的土壤选取 2~5 mm 大小的团聚体, 保证其至少有一个面的耕作处理纹理未受到人为破坏挤压。将选取好的小土块置于离子溅射仪 (MST-ES, 日立公司, 日本) 进行喷金处理, 然后用扫描电子显微镜观察不同耕作处理超微形态特征。

土壤比表面和孔隙度采用全自动三站式比表面积和孔隙度分析仪 (TristarII3020 型, 麦克默瑞提克 (上海) 仪器有限公司) 测定。试验条件: 饱和蒸汽压/kPa: 10, 脱气系统温度范围为 20~200 °C, 吸附气体为氮气。

1.5 土壤养分含量测定

参考《土壤农业化学分析方法》^[24]测定方法: 其中, pH 用电位法测定, 水土比为 2.5 : 1.0; 有机质用重铬酸钾外加热法测定; 全氮含量用半微量凯氏定氮法测定; 碱解氮含量用碱解扩散法测定; 有效磷含量用 $0.05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HCl} \sim 0.025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($1/2 \text{ H}_2\text{SO}_4$) 法测定; 速效钾含量用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 中性 NH_4OAc 浸提、火焰光度法测定。

1.6 甘蔗产量及品质性状测定

试验均在每个小区取 10 m 长度的甘蔗进行称量, 然后换算成理论产量; 每处理小区随机取 10 株甘蔗, 分别用数显糖度计 (AMR100, 美国)、游标卡尺和卷尺对甘蔗的糖分 (取甘蔗上、中、下部位的平均值)、茎径和株高进行测量。

1.7 数据处理

结构体破坏率是表征土壤团聚体结构特征的重要指标之一, 反映了团聚体对水的稳定性, 结构体破坏率越小, 土壤结构越稳定^[25]。计算公式如下:

$$\text{PAD} = (w_d - w_w) / w_d \times 100\% \quad (1)$$

式中, PAD 为结构体破坏率, %; w_d 为风干团聚体中大于 0.25 mm 粒级所占的比例, %; w_w 为水稳性

团聚体中大于 0.25 mm 粒级所占的比例, %。

本试验基础数据采用 SPSS19 和 EXCEL2010 软件进行单因素方差分析和邓肯 (Duncan) 法多重比较, 制图由 Origin 8 制图软件完成。

2 结果与讨论

2.1 不同耕作方式下赤红壤养分变化

由表 1 可知, 不同耕作方式下, DT40 的 pH 相对于其他耕作方式低 0.25~0.35 个单位; 对于全氮、碱解氮、速效钾和有效磷的含量, DT40 低于其他三种耕作方式且均达到差异显著 ($P<0.05$); 而有机质变化不明显 ($P>0.05$)。不同耕作方式下土壤的 pH 和养分的差异主要是 DT40 与其他耕作方式的差异, 原因在于 DT40 改变了土层, 使下层土上翻;

而在原状土中, 上下土层 pH 和养分存在差异, 这是 DT40 土壤养分不同于其他耕作的主要原因。其中, 粉垄耕作略大于 CT20, 但未达到显著差异水平, 这可能与粉垄耕作扰动土壤矿物晶粒所释放的养分较高有关。

2.2 不同耕作方式下赤红壤团聚体分布特征

2.2.1 机械稳定性团聚体分布特征 由表 2 可知, 赤红壤机械稳定性团聚体在不同耕作方式下存在差异。FL40 的 0.5~0.25 mm 和 1~0.5 mm 粒径团聚体含量显著高于其他三种方式 ($P<0.05$), 其中, FL40 与 DT40 之间差异最大。相反, 大于 3 mm 粒径团聚体含量 DT40 则显著高于其他三种方式 ($P<0.05$), 其他三种耕作方式之间差异不显著 ($P>0.05$)。其余各粒径团聚体含量在不同耕作方式下则差异不显著 ($P>0.05$)。

表 1 不同耕作方式下土壤的理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the tested soil relative to tillage

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
CT20	4.83±0.03b	32.94±0.03a	1.62±0.06a	245.46±4.21a	7.84±0.09b	219±4a
FL20	4.82±0.02b	33.60±0.07a	1.64±0.14a	266.15±4.14a	8.69±0.26ab	257±1a
FL40	4.92±0.05a	35.46±0.11a	1.60±0.02a	255.58±11.73a	9.70±0.05a	244±4a
DT40	4.57±0.03c	31.10±2.83a	1.36±0.05b	215.13±12.44b	3.35±0.46c	174±2b

注: CT20、FL20、FL40 和 DT40 分别代表处理常规旋耕 20 cm、粉垄 20 cm、粉垄 40 cm 和深翻旋耕 40 cm, 同列小写字母不同表示处理间差异达 0.05 显著水平。下同。Note: CT20, FL20, FL40 and DT40 stands for conventional rotary tillage 20 cm in depth, deep vertically rotary tillage 20 cm in depth, deep vertically rotary tillage 40 cm in depth and deep rotary tillage 40 cm in depth, and different lowercase letters in the same column mean significant difference at the 0.05 level. The same below.

表 2 不同耕作方式下土壤机械稳定性团聚体组成

Table 2 Distribution of soil mechanically stable aggregates relative to tillage/ (g·kg⁻¹)

处理 Treatment	>3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm
CT20	355.4±36.5b	124.2±14.5a	225.0±14.2a	171.2±2.7b	108.9±7.1b	984.7±1.9a
FL20	348.3±6.9b	126.9±18.7a	222.4±6.6a	178.0±9.2b	99.0±7.1b	974.6±2.3a
FL40	291.9±15.5b	112.4±4.1a	222.7±10.1a	209.0±4.5a	139.2±7.1a	975.2±10.1a
DT40	472.4±55.2a	125.0±18.8a	194.6±5.8a	132.3±3.0c	67.2±0.40c	991.5±7.2a

四种耕作方式下, 各处理均以大于 0.25 mm 粒径团聚体为优势团聚体。在不同耕作方式下, 机械

稳定性各粒径团聚体存在不同的差异。相对于其他三种耕作方式, FL40 耕作处理下大团聚体向 1~

0.25 mm 粒径的中团聚体转化明显；这主要由于 FL40 处理对土体的扰动强度和深度较大，减少了土壤的大团聚体，而增加了土壤中、微团聚体。Bailey 等^[26]研究指出，较小的团聚体内部大孔隙较多，其形成的土壤总孔隙和孔隙表面积较大，更利于作物根系下扎和水分与养分的吸收。

2.2.2 水稳性团聚体分布特征 由表 3 可知，不同耕作方式下赤红壤水稳性团聚体各粒径含量分布中，均为 2~1 mm 粒径范围内含量所占比例最大，FL20 相对于 CT20 和 DT40 均达到差异显著 ($P<0.05$)。大于 3 mm 粒径团聚体含量中，FL40 与

DT40 和 CT20 达到显著水平 ($P<0.05$)，FL40 与 DT40 差异最大。在 3~2 mm 粒径范围内，DT40 显著低于 FL40 和 CT20 ($P<0.05$)，与 FL20 差异不显著 ($P>0.05$)；在团聚体其他粒径中，差异则不明显。

四种耕作方式下，赤红壤结构体破坏率表现为：DT40>FL40>CT20>FL20。说明在这四种耕作方式下，DT40 土壤结构最不稳定；反之，FL20 土壤结构最稳定。但 FL20 与 CT20 土壤结构体破坏率差异极小，即稳定性差异不明显。该研究中，耕作机械力与土层翻动共同影响着土壤结构体，对其进行量化且明确作用机理是今后研究的重点和难点之一。

表 3 不同耕作方式下土壤水稳性团聚体组成

Table 3 Distribution of soil water-stable aggregates relative to tillage/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	>3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm	PAD/%
CT20	159.4±2.7ab	196.2±12.8a	253.2±22.1bc	184.3±19.3a	119.2±35.1a	912.3±9.2a	7.35
FL20	119.4±9.7bc	154.9±20.2ab	330.1±19.3a	158.1±1.3a	148.3±7.1a	910.8±19.8a	6.55
FL40	113.2±6.0c	187.0±3.3a	310.9±5.0ab	169.6±17.1a	110.6±3.6a	891.3±0.8a	8.60
DT40	169.6±7.6a	129.7±1.9b	237.0±5.7c	180.7±2.0a	142.4±2.1a	859.4±9.1a	13.32

注：PAD：结构体破坏率。Note: PAD: Failure rate of structures.

水稳性团聚体中，不同耕作处理大于 3 mm 粒径团聚体含量较机械稳定性均明显减少，3~1 mm 和小于 0.25 mm 粒径团聚体含量明显增多。其中，DT40 在大于 3 mm 粒径团聚体含量减少最为明显，但在小于 0.25 mm 粒径微团聚体增加显著，在四种不同耕作方式下土壤结构体最不稳定；这主要是由于 DT40 耕作处理是将下层土 (20~40 cm) 翻成上层土 (0~20 cm)，土壤的稳定性与粉垄和常规旋耕不破坏土层的方式存在差别，从而使团聚体各粒径与其他耕作存在差异。不同粒径团聚体在养分的转化和供应过程作用不同^[27]，微团聚体较大团聚体具有较大的比表面，影响了土壤的物理、化学与生物特性。不同耕作方式对团聚体分散、破碎、重新排列和再团聚过程的改变影响土壤的结构和功能，导致作物根系吸收利用水分与养分的效率不同。在今后的研究中，应关注土壤团聚体各粒径含量动态变化。

粉垄耕作较传统耕作方式具有碎土性好、松土量大和机械钻头横向扰动土壤等特点，增加了土壤中、微团聚体含量，而小粒级的团聚体养分储量

会得到提升，更有利于作物对土壤养分的吸收，这可能是粉垄耕作能使作物增产提质的重要原因，对农业生产具有重要意义。

2.3 不同耕作方式下赤红壤团聚体微形态特征

如图 1 所示，将土壤团聚体表面放大 1 000 倍，能够从 SEM 图像中直观地看出赤红壤的微结构，并且能够粗略判断赤红壤剖面黏土矿物的类型。土壤微结构呈现三维图像，能够准确区分结构体和颗粒体、土壤微结构类型及微孔隙类型等。

从耕作前可看出，原状土下层土壤中清晰可见絮片状黏粒物质连接成的团聚体和腐殖质及形成的孔道。耕作处理后，赤红壤形态特征上存在明显的差异；与其他耕作方式相比，粉垄耕作方式下土壤微形态表面光滑、骨骼颗粒细小紧实，排列紧密、规则且具有一定的定向性；各处理均有较多的孔道状微孔隙。

如图 2 所示，将图 1 继续放大至 5 000 倍，从耕作前可看出，原状土粗骨颗粒排列较紧密，磨圆度较高；而耕作后，明显看出粉垄耕作处理细颗粒体较小，形成的结构体呈絮片状，疏松而不松散。

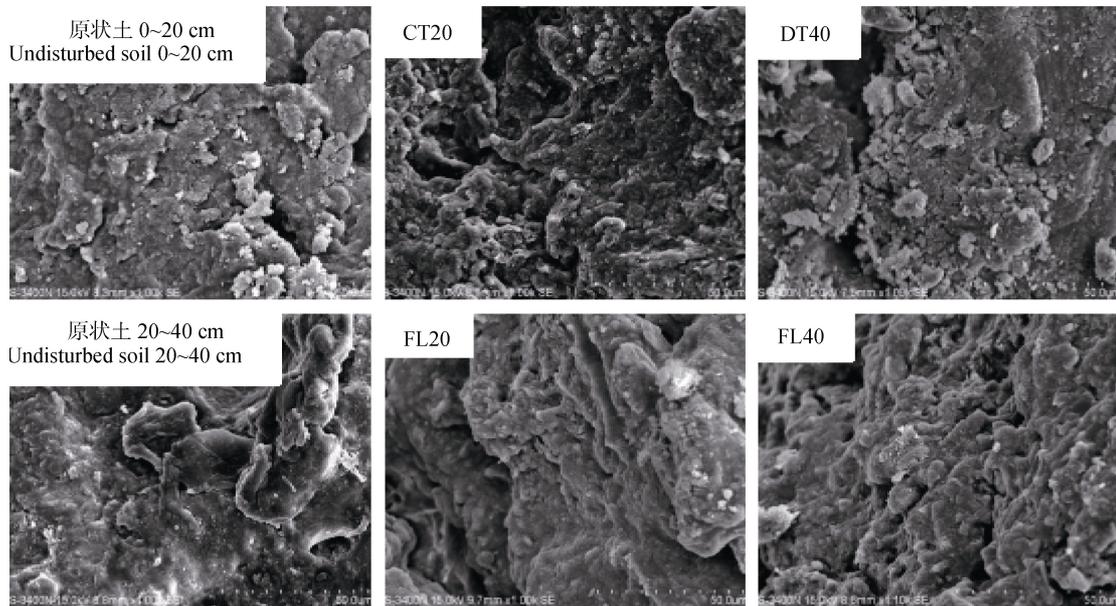


图 1 不同耕作方式下土壤扫描电子显微镜 (SEM) 图像 (放大 1 000 倍)

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) images of the soil relative to tillage (magnify 1 000 times)

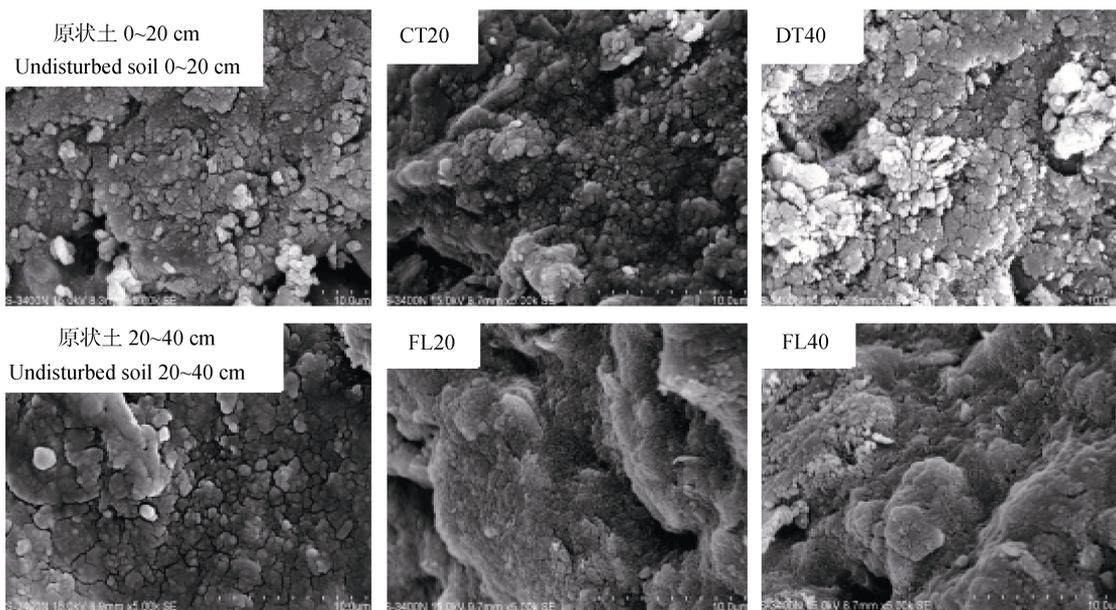


图 2 不同耕作方式下土壤扫描电子显微镜 (SEM) 图像 (放大 5 000 倍)

Fig. 2 Scanning electron microscope (SEM) images of the soil relative to tillage (magnify 5 000 times)

如图 3 所示, 将图 2 继续放大至 1 万倍, 从耕作前可看出, 原状土骨颗粒磨圆度高, 排列紧密且粒间孔隙明显; 从耕作后可看出, 在不同耕作方式下, 对土壤微形态颗粒影响着明显差异; CT20 与 DT40 骨骼颗粒与原土磨圆度类似, 而粉垄耕作处理骨骼颗粒更小, 粒级孔隙不明显, 排列紧密且表面明显光滑。

不同耕作处理对土壤微形态的影响变化存在差异, 通过扫描电镜 (SEM) 三种不同视场观察表面超微形态, 能够较清晰地看出土壤表面的孔壁、孔道和微孔隙, 这些微孔隙主要集中在 $5\sim 200\ \mu\text{m}$, 具有通气性、水分储存的功能; 土壤微孔隙的类型、数量、组合及剖面分布状况, 对土壤肥力具有重要的意义^[28]。粉垄耕作较 CT20 和 DT40 呈现出土壤表面骨骼颗粒细小,

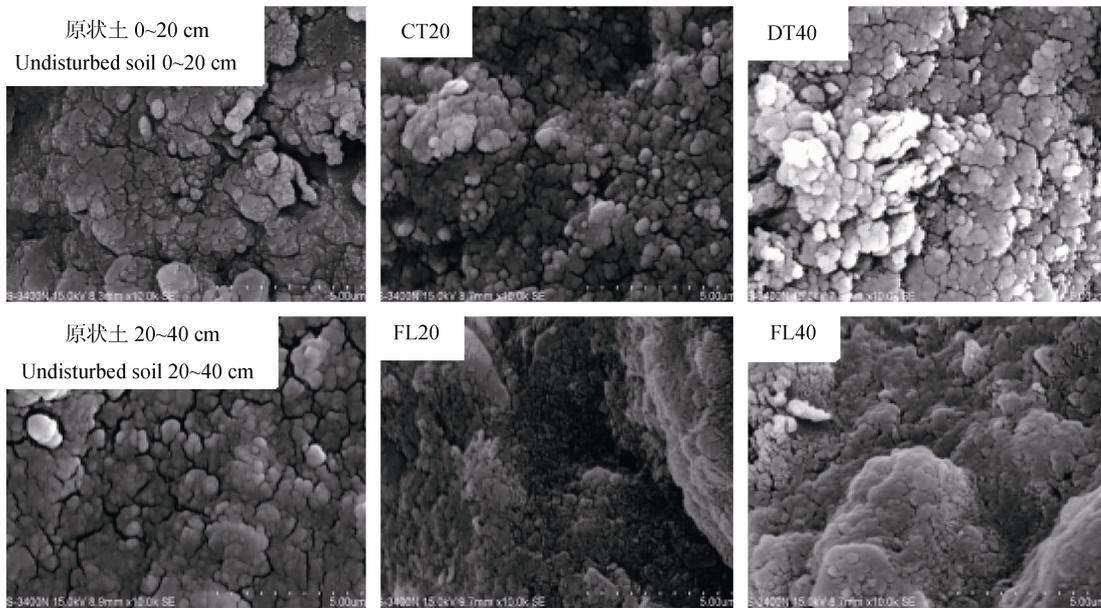


图3 不同耕作方式下土壤扫描电子显微镜 (SEM) 图像 (放大 10 000 倍)

Fig. 3 Scanning electron microscope (SEM) images of the soil relative to tillage (magnify 10 000 times)

排列规整且紧密, 表面更光滑和孔隙更发达等特点, 对水分和养分吸收利用可能具有更大吸附性能。粉垄耕作与传统耕作相比, 不仅赤红壤各粒级团聚体含量分布存在差异, 而且团聚体表面微形态也存在着差异; 这些形态结构的差异, 极可能是粉垄耕作技术能增产提质的重要原因之一。

2.4 不同耕作方式下赤红壤比表面积及孔结构变化

采用氮气吸脱附法对不同耕作处理赤红壤的比表面、孔结构及孔径分布的变化进行了研究和分析。表 4 为不同耕作处理后土样 BET 比表面积和气体吸附与解吸 (BJH 法) 的平均孔径表。由表 4 可知, 不同耕作方式下赤红壤的孔结构以微孔为主。耕作方式

的不同, 存在着微小差异; 比表面积大小表现为粉垄耕作略大于其他耕作, 平均孔径的大小也呈现类似的规律。土壤微形态的差异通过比表面积和孔隙度分析仪测定分析, 可看出, 粉垄耕作下赤红壤的 BET 比表面积较 CT20 达显著差异水平 ($P < 0.05$); 较高的比表面积说明土壤存在大量的微孔和介孔^[29]; 吸脱附平均孔径大小也呈现出类似的规律, 进一步说明耕作方式能对黏土矿物土壤颗粒之间的孔隙分布产生影响。研究表明^[30-31], 土壤纳米级孔隙表面能发生许多化学反应, 养分在土壤颗粒上的吸脱附行为, 与纳米孔隙有关。在今后的研究中, 应注重研究不同耕作方式下赤红壤对养分的吸附与解吸效应, 进一步验证各耕作处理产生的化学反应差异。

表 4 不同耕作方式下赤红壤的比表面积与平均孔径

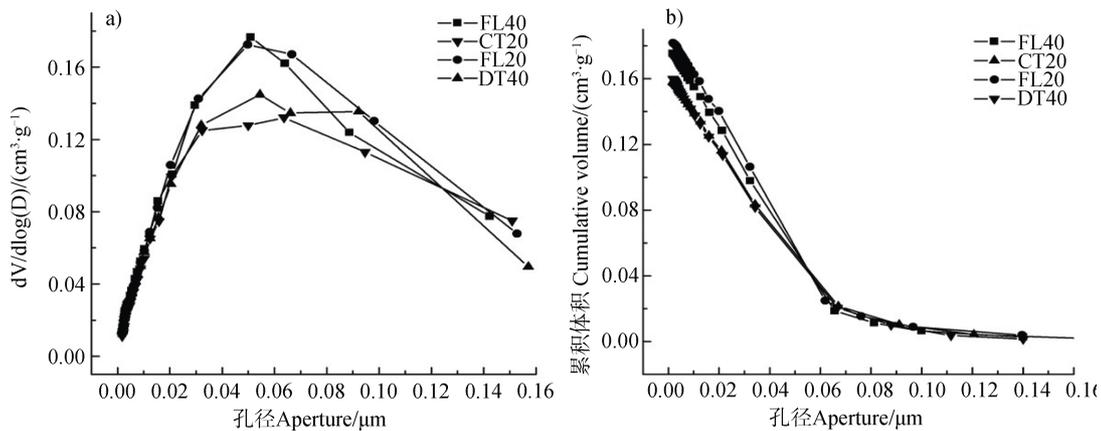
Table 4 Specific surface area and average pore diameter of the lateritic red soil relative to tillage

处理 Treatment	BET 比表面积 BET Surface Area / ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	吸附平均孔径 Adsorption average pore diameter/nm	BJH 法吸附平均孔径 BJH Adsorption average pore diameter/nm	BJH 法解吸平均孔径 BJH Desorption average pore diameter/nm
CT20	34.13b	18.53a	18.12ab	17.00ab
FL20	37.47a	19.40a	18.97a	17.81a
FL40	38.12a	19.31a	19.83a	18.41a
DT40	37.27a	17.17a	16.60b	15.71b

氮气吸附法的土壤孔隙微分曲线和累积曲线见图 4。氮气吸附 (NAI) 的测量范围在 $0.001\sim 0.1\ \mu\text{m}$ ，这也是土壤黏土矿物颗粒之间的孔隙分布范围，这些孔隙与土壤耕作方式有关^[32]。微分曲线的峰值所出现的位置是最可几孔隙，代表出现几率最大的孔隙。不同耕作方式下土壤的最可几孔隙均出现在 $0.04\sim 0.06\ \mu\text{m}$ 之间，CT20 峰值最小。FL40 微分曲线为最高，DT40 次之，CT20 最低。由于 FL20 和 FL40 对土壤本身的表层土的扰动强度类似，所以它们的微分曲线重合度很高；孔隙体积累积曲线也呈现出相同的规律。

根据土壤孔隙性质和大小，可分为构造孔隙和结构孔隙。构造孔隙与土壤颗粒组成有关，主要指团聚

体内部的孔隙或细小颗粒间的孔隙，具有较高稳定性。结构孔隙与土壤团聚体有关，主要指微团聚体之间和团聚体之间的孔隙，其稳定性易受外界环境的扰动；显然，耕作方式会对土壤构造孔隙，特别是结构孔隙产生影响。由 Tisdall 和 Oades^[33] 的等级理论可知，微团聚体依靠阳离子桥或有机聚合物形成有机-矿物复合体稳定自身结构，大团聚体则主要依靠多糖等有机物质。土壤的团聚体和土壤孔隙是构成土壤结构的重要组成部分，土壤结构的差异决定了土壤的水、肥、气、热状况，也决定了土壤生物、微生物的“生活”场所及运动通道。不同耕作方式下赤红壤不同尺度的孔隙度动态变化有待进一步研究，进而探明不同耕作下土壤团聚体及孔隙大小变化机理。



注：dV/dlog (D) 代表微分体积 Note: The dV/dlog (D) represent differential volume

图 4 不同耕作方式下氮气吸附土壤孔隙微分曲线 (a) 和累积曲线 (b))

Fig. 4 Differential curves (a)) and cumulative curves (b)) of nitrogen adsorption in soil pores relative to tillage

2.5 不同耕作方式下甘蔗产量及品质

由表 5 可知，四种耕作方式下甘蔗产量及品质

性状存在差异，粉垄耕作下甘蔗产量较高，其中，FL20 较 DT40 和 CT20 差异达到显著水平。FL20 较

表 5 不同耕作方式对甘蔗产量及品质性状的影响

Table 5 Effects of tillage on yield and quality of sugarcane relative to tillage pattern

处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	茎径 Stem diameter/ mm	蔗糖分 ¹⁾ Sucrose content/ %	产量 Yield/ (t·hm ⁻²)
CT20	300.9±31.9a	28.18±2.36a	18.26±0.35b	92.0±3.3b
FL20	326.6±21.3a	30.12±1.92a	18.37±0.27b	114.9±0.8a
FL40	315.8±13.1a	29.41±2.44a	19.14±0.23a	103.4±4.0ab
DT40	299.1±49.8a	28.86±2.49a	18.28±0.55b	99.7±3.5b

注：1) 数显糖度计测定。Note: 1) Determination by the digital display sugar meter.

FL40 产量高,其主要原因可能是 FL20 下层土(20~40 cm)较 FL40 下层土保水性好;而 FL40 的糖分最高,糖分含量较 FL20、DT40 和 CT20 分别增加了 4.2%、4.7%和 4.8%,且均达到显著差异($P<0.05$),其原因可能是该处理机械对土壤扰动的深度和强度最大,释放了土壤中更多矿物养分的同时,对后期施肥的养分储蓄和释放具有更好的效应。与 CT20 比较,FL40 与 DT40 增加了作物产量,但效果不明显,说明耕作层增加能提升作物产量,与韩上等^[34]研究结果一致。综上所述,粉垄耕作对甘蔗有增产提质的效果。

3 结 论

不同耕作方式下,赤红壤机械稳定性和水稳性团聚体分布存在差异。其中,FL40 在 0.5~0.25 mm 和 1~0.5 mm 粒径机械稳定性团聚体含量显著高于其他耕作方式;大于 3 mm 粒径水稳性团聚体含量中,FL40 较 DT40 和 CT20 差异显著;粉垄耕作与 CT20 和 DT40 相比,土壤骨骼颗粒呈现出颗粒细小、排列规则且紧密、表面光滑、比表面积大及孔隙发达等特点。结果表明,粉垄耕作使作物达到增产提质的效果。

参考文献 (References)

- [1] Huang J S, Xie R L, Zeng Y, et al. Effects of long-term fertilization on fertility of lateritic red loams paddy. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29 (5): 1144—1149. [黄金生, 谢如林, 曾艳, 等. 长期不同施肥对赤红壤稻田区肥力的影响. *西南农业学报*, 2016, 29 (5): 1144—1149.]
- [2] Lu S H, Zhang C L, Deng L S, et al. Effects of K fertilization on yield and quality of sugarcane under drip irrigation. *Sugar Crops of China*, 2009, 31 (1): 12—14, 17. [陆树华, 张承林, 邓兰生, 等. 滴灌条件下不同施钾量对甘蔗产质量的影响. *中国糖料*, 2009, 31 (1): 12—14, 17.]
- [3] Li Y R, Yang L T. New developments in sugarcane industry and technologies in China since 1990s]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22 (5): 1469—1476. [李杨瑞, 杨丽涛. 20 世纪 90 年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展. *西南农业学报*, 2009, 22 (5): 1469—1476.]
- [4] Jin S Q, Zhou F. Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use; China's objectives, progress and challenges. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9 (S1): 50—58.
- [5] Kay B, VandenBygaart A. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66 (2): 107—118.
- [6] Hou X Q, Li R, Jia Z K, et al. Effects of rotational tillage practices on soil properties, winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north-west China. *Field Crops Research*, 2012, 129: 7—13.
- [7] He X. Effects of different tillage on physicochemical properties of farmland mollisoid and PS II function of maize leaves. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. [何鑫. 不同耕作方式对农田黑土理化性质及玉米叶片 PS II 功能的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.]
- [8] Cheng C, Wang J J, Cheng H H, et al. Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 247—257. [成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响. *土壤学报*, 2018, 55 (1): 247—257.]
- [9] Tan J J, Yang S D. Mechanization development of sugarcane production in Guangxi. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49 (4): 806—811. [谭俊杰, 杨尚东. 广西甘蔗生产全程机械化发展研究. *南方农业学报*, 2018, 49 (4): 806—811.]
- [10] Qu T, Li X, Tang M J, et al. Effects of the excited-vibration subsoiler on soil properties. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40 (12): 179—183. [屈通, 李霞, 汤明军, 等. 自激振动深松对土壤物理特性的影响. *农机化研究*, 2018, 40 (12): 179—183.]
- [11] Liu B, Wu L S, Lu J W, et al. Research progress on the effects of different tillage methods on soil physical and chemical properties. *Tillage and Cultivation*, 2010 (2): 55—58, 65. [刘波, 吴礼树, 鲁剑巍, 等. 不同耕作方式对土壤理化性质影响研究进展. *耕作与栽培*, 2010 (2): 55—58, 65.]
- [12] Wang H. Wei benhui and his deep vertically rotary tillage technology. *Science Technology Innovations and Brands*, 2015 (7): 54—55. [王辉. 韦本辉和他的粉垄技术. *科技创新与品牌*, 2015 (7): 54—55.]
- [13] Wei B H. Yield increasing and quality improving effects of smash-ridging method (“4453” effects) and its potential in benefiting the nation and the people. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42 (27): 9302—9303. [韦本辉. 粉垄“4453”增产提质效应及其利民利国发展潜能. *安徽农业科学*, 2014, 42 (27): 9302—9303.]
- [14] Feng L, Xiong X. Ministry of Agriculture: Leading in the world in deep vertically rotary tillage technology. 2018-01-17 [2019-04-06]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2018/0117/c1007-29770591.html>. [冯粒, 熊旭. 农业部: 粉垄耕作国际领先. 2018-01-17[2019-04-06]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2018/0117/c1007-29770591.html>.]
- [15] Wei Y, Zhao Z Q. The first cultivation with deep vertically rotary tillage technology, Yuan Longping super grain wants to reach a new high. 2016-12-26[2019-04-06]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2016/1226/c1007-289765>

- 56.html. [魏艳, 赵竹青. 首次采用粉垄技术栽培, 袁隆平超级水稻欲冲新高. 2016-12-26[2019-04-06]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2016/1226/c1007-28976556.html>.]
- [16] Xu G X. Deep vertically rotary tillage technology: Unlimited space-time releases “natural force” for the benefit of mankind. 2018-10-31[2019-04-06]. <http://www.ceh.com.cn/syzx/1094010.shtml>. [徐国信. 粉垄技术: 无限时空释放“自然力”造福人类. 2018-10-31[2019-04-06]. <http://www.ceh.com.cn/syzx/1094010.shtml>.]
- [17] Wang C X, Yue X J, Ge X Z, et al. Effects of conservational tillage measures on distributions of organic carbon and nitrogen in soil microaggregates. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (3): 642—649. [王彩霞, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 保护性耕作对土壤微团聚体碳、氮分布的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (3): 642—649.]
- [18] Zhang X C, Li H W, He J, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in Northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2013, 44 (S1): 77—82, 71. [张祥彩, 李洪文, 何进, 等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性的影响. *农业机械学报*, 2013, 44 (S1): 77—82, 71.]
- [19] Liu Y, Ma M H, Wu S J, et al. Soil aggregates as affected by wetting-drying cycle: A review. *Soils*, 2018, 50 (5): 853—865. [刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望. *土壤*, 2018, 50 (5): 853—865.]
- [20] Wang E H, Zhao Y S, Xia X Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on black soil structure at different size scales. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (21): 6287—6296. [王恩姮, 赵雨森, 夏祥友, 等. 冻融交替后不同尺度黑土结构变化特征. *生态学报*, 2014, 34 (21): 6287—6296.]
- [21] Jiang Y, Liu B, Fan H M, et al. Macropore structure characteristics of black soil under freeze-thaw condition. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 340—349. [姜宇, 刘博, 范昊明, 等. 冻融条件下黑土大孔隙结构特征研究. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 340—349.]
- [22] Jin X M, Du J, Shen R Z, et al. The effect of sumash-ridging cultivation technology on the growth and yield of corn in Yellow River irrigation district of Ningxia. *Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 34 (1): 50—53. [靳晓敏, 杜军, 沈润泽, 等. 宁夏引黄灌区粉垄栽培对玉米生长和产量的影响. *农业科学研究*, 2013, 34 (1): 50—53.]
- [23] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3): 627—633.
- [24] Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [25] Liu M Y, Wu J L, Liu L W, et al. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use patterns on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31 (9): 1564—1576. [刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响. *自然资源学报*, 2016, 31 (9): 1564—1576.]
- [26] Bailey V L, McCue L A, Fansler S J, et al. Micrometer-scale physical structure and microbial composition of soil macroaggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 60—68.
- [27] Liu W L, Wu J G, Fu M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fractions in orchard. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (1): 129—135. [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. *水土保持学报*, 2014, 28 (1): 129—135.]
- [28] He Y R, Xu X M, Liu L. Soil properties and SEM features of diagnostic horizon of stagnic anthrosols in southwestern China. *Journal of Mountain Research*, 2009, 27 (6): 727—734. [何毓蓉, 徐祥明, 刘黎. 西南地区水耕人为土诊断层土壤特性及 SEM 特征. *山地学报*, 2009, 27 (6): 727—734.]
- [29] Filimonova S, Kaufhold S, Wagner F E, et al. The role of allophane nano-structure and Fe oxide speciation for hosting soil organic matter in an allophanic Andosol. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 180: 284—302.
- [30] Jung H B, Xu H F, Konishi H, et al. Role of nano-goethite in controlling U (VI) sorption-desorption in subsurface soil. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 169: 80—88.
- [31] Hochella M F. Nanogeoscience: From origins to cutting-edge applications. *Elements*, 2008, 4 (6): 373—379.
- [32] Huang C Y. *Textbook series for 21st century, Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [黄昌勇. *面向 21 世纪课程教材, 土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [33] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*, 1982, 33 (2): 141—163.
- [34] Han S, Wu J, Xia W G, et al. Effects of topsoil thickness on crop yields and nutrient uptake as well as soil nutrients. *Soils*, 2018, 50 (5): 881—887. [韩上, 武际, 夏伟光, 等. 耕层增减对作物产量、养分吸收和土壤养分状况的影响. *土壤*, 2018, 50 (5): 881—887.]

(责任编辑: 陈荣府)