江西农业大学学报　2024,46(6)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2024144

张文龙,邵金华,黄凯,等.不同耕作方式对广西旱坡地土壤粒径分布特征的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(6):1668-1679.

ZHANG W L,SHAO J H,HUANG K,et al.Effect of different tillage methods on soil particle size distribution characteristics in dry sloping fields of Guangxi[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(6):1668-1679.

不同耕作方式对广西旱坡地土壤粒径分布特征的影响

张文龙[1],邵金华[1,2],黄　凯[2*],陈立民[3],韦本辉[4],黄国勤[1*]

(1.江西农业大学 生态科学研究中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西 南昌 330045;2.广西壮族自治区水利科学研究院 广西水工程材料与结构重点实验室,广西 南宁 530023;3.广西壮族自治区钦州市灌溉试验站,广西 钦州 535000;4.广西壮族自治区农业科学院 经济作物研究所,广西 南宁 530007)

摘要:【目的】针对南方旱坡地犁底层上移、土壤水肥流失严重、产量不稳等问题,通过探讨不同耕作方式对旱坡地土壤粒径分布特征的影响,为构建和改善土壤耕层结构、促进作物根系生长、选择有效的耕作方式和作物提质增效提供理论依据。【方法】以广西旱坡地主栽甘蔗品种"桂糖44号"为供试作物,在广西钦州市开展大田试验,设置3种耕作方式(粉垄耕作、旋耕、免耕),采用激光粒度仪测定甘蔗地0~40 cm土层中土壤的粒径分布。通过对土壤粒径组成、土壤质地、粒度参数特征和粒度频率分布的研究,阐明不同耕作措施对调控土壤粒径分布的作用。【结果】(1)不同耕作处理中土壤主要以中砂粒、细砂粒和粉粒为主,占比高达75.10%~87.59%;土壤质地类型可以划分为砂土、壤质砂土和砂质壤土。(2)各土层土壤整体分选效果极好,土壤平均粒径在2.66~4.58 mm;偏度表现为极负偏,表明土壤粒度中粗粒物质占比远大于细粒物质;土壤峰度等级在很宽平和中等之间,且随着土壤深度的增加土壤峰度等级趋于宽平。(3)与旋耕和免耕相比,粉垄耕作增加土壤耕层深度,降低了表层土壤中粘粒、粉粒和细砂粒含量,使其在耕作底层累积;同时土壤粒径分布频率曲线由双峰分布变为单峰分布,且峰值高度、峰值范围对应粒径大小和土壤粒度累计频率曲线斜率也远大于旋耕和免耕处理,表明粉垄耕作使得土壤粒径分布更加集中。【结论】不同的土壤耕作方式可以显著的改变土壤粒径分布,进而促进构建合理的土壤耕层结构和作物根系生长发育。粉垄耕作处理对构建土壤耕层结构效果较好,土壤粒径整体趋于粗粒化,促进土壤的不均匀性,增加土壤结构稳定性。研究结果可进一步在广西地区旱坡地种植管理中推广应用,确保农作物增产稳产。

关键词:耕作方式;旱坡地;土壤粒径分布;土壤质地;土壤粒度参数
中图分类号:S343.1　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2024)06-1668-12

Effect of different tillage methods on soil particle size distribution characteristics in dry sloping fields of Guangxi

ZHANG Wenlong[1],SHAO Jinhua[1,2],HUANG Kai[2*],CHEN Limin[3],
WEI Benhui[4],HUANG Guoqin[1*]

收稿日期:2024-05-20　　**修回日期:**2024-07-11
基金项目:广西重点研发计划项目(桂科AB22035057,桂科AB23026021)
Project supported by Guangxi Key R&D Program Project(Guike AB22035057,Guike AB23026021)
作者简介:张文龙,博士生,orcid.org/0000-0003-4843-4809,2641698921@qq.com;*通信作者:黄凯,博士,博士生导师,主要从事农业节水灌溉、农村水利生态等研究,orcid.org/0009-0003-0623-8140,gxhuangkai@126.com;黄国勤,教授,博士生导师,主要从事耕作制度、农业生态、农业可持续发展等研究,orcid.org/0009-0004-3159-7644,hgqmail441@sohu.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetics Breeding, College of Agriculture, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Institute of Hydraulic Science, Guangxi Zhuang Autonomous Region/Guangxi Key Laboratory of Water Engineering Materials and Structures, Nanning 530023, China; 3. Irrigation Experiment Station of Qinzhou City, Qinzhou 535000, China; 4. Institute of Cash Crops, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to address the challenges of subsoil compaction, significant soil and nutrient loss, and unstable crop yields in the dry sloping of southern China. It investigated the impacts of various tillage methods on soil particle size distribution to provide a theoretical foundation for optimizing soil tillage layer structure, promote crop root development, and select efficient tillage practices to enhance crop quality and yield. [**Method**] Using the sugarcane variety "Gui Sugar 44" as the test crop, field experiments were conducted on dry slopes in Qinzhou City, Guangxi, China. Three tillage methods (Fen-long tillage, rotary tillage, and no-tillage) were implemented, with no-tillage as the control treatment. A laser particle size analyzer was used to determine the soil particle size distribution within the 0-40 cm soil layer. The effects of different tillage practices on soil particle size distribution were elucidated by analyzing soil particle size composition, soil texture, particle size parameter characteristics, and particle size frequency distribution. [**Result**] The soil in different tillage treatments was mainly composed of medium sand, fine sand and silt, accounting for 75.10%-87.59%. Soil textures were classified as sandy soil, sandy loam, and loamy sand. The overall sorting effect of soil in each soil layer is excellent, with mean particle sizes ranging from 2.66 to 4.58 mm. The skewness was strongly negative, indicating a greater proportion of coarse particles than fine ones. Kurtosis values ranged from broad-flat to moderate, with a tendency toward broad-flat as soil depth increased. Compared with rotary tillage and no-tillage, Fen-long tillage significantly increased the depth of the tillage layer, reduced the clay, silt, and fine sand content in the topsoil, thus leading to their accumulation in the subsoil. Moreover, the soil particle size distribution frequency curve shifted from a bimodal to an unimodal distribution. The peak height, peak width corresponding to particle size, and the cumulative frequency curve slope were much higher under Fen-long tillage compared with those of rotary tillage and no-tillage. This suggests that Fen-long tillage resulted in a more concentrated soil particle size distribution. [**Conclusion**] Various soil tillage methods can profoundly influence soil particle size distribution, thereby fostering the development of an optimal tillage structure and stimulating robust crop root growth. The Fen-long tillage technique is especially effective in establishing an optimal tillage structure, which leads to a notable coarsening of soil particles, thus enhancing soil heterogeneity, and improving soil structural stability. It can be further applied in the planting management of dry slope land in Guangxi to ensure the increase and stable yield of crops.

Keywords: tillage methods; dry slopes; soil particle size distribution; soil texture; soil particle size parameters

【研究意义】食糖作为关系国计民生的战略物资,在食品加工行业中具有不可替代的重要地位。我国主要以甘蔗为原料,其中甘蔗的产糖量占我国食糖总产量的90%以上[1]。广西是全国最大的糖料种植基地、最大的食糖主产区,是保障国家食糖安全的主阵地。糖料蔗种植面积稳定在73万 hm^2 以上,食糖产量稳定在600万 t 以上,甘蔗产量和产值仅次于粮食、油料、棉花,居第4位[2],糖料蔗种植面积和食糖产量连续32个榨季位居全国第一、连续19个榨季占全国的60%左右[3-4],在保证国家糖业安全中具有举足轻重的地位。广西地处我国南部,耕地面积326.01万 hm^2,其中旱坡地农田占50.54%。各地年平均降水量841.2~3 387.5 mm,降雨丰富但时空分布不均匀,6—9月为雨季,总降水量占全年降水量的70%~85%[5]。属于典型的亚热带季风气候区和热带季风气候,雨热同期,其农业种植属于典型的雨养农业。当地传统耕作方式以旋耕为主(旋耕深度20 cm),连年旋耕导致土壤水分蒸发加剧,进而加剧水土流失现象,尤其是在旱坡地,降雨冲刷侵蚀更为严重,造成水土流失和肥料的浪费,导致作物产量不稳定且较

低，同时也加剧生态环境的恶化，严重制约旱坡地农业的可持续发展。此外，当地传统的耕作方式使得土壤有效耕层变浅，犁底层上移，进而导致土壤结构恶化，严重影响作物根系的生长和对水分、养分的吸收，从而限制了该区粮食的生产[6-8]。因此，采取新型的土壤耕作方式合理利用当地土地资源来应对农田土壤流失、土地生产力低的现状，充分挖掘我国南方旱坡地糖料蔗的生产潜力，确保糖料蔗稳产高产成为该地区农业发展的首要方向之一，也是我国食糖供给安全的重要研究课题。【前人研究进展】土壤粒径分布是土壤中颗粒大小和组成的分布情况，对水分保持、透气性和保肥能力等起关键作用，其受不同耕作措施的直接影响[9-11]。粉垄耕作是一种新型的保护性耕作技术。它采用专用机械和垂直螺旋型钻头，通过在水平方向旋磨和粉碎土壤，将土壤细碎后自然形成垄，通过在尽可能少地扰动土层的情况下，一次性实现土壤的深松、深耕和整地，从而简化了耕地作业程序。这种耕作方式能够精准地控制，打破犁底层，有效降低土壤容重，减少水分蒸发损失，改善土壤渗透性能，提高水肥利用率，进而有效地抑制水土流失和土壤侵蚀，实现了少耕、高产、保护性耕作的目标[12-16]。王少博等[17]研究表明，棕壤土在长期保护性耕作措施下，免耕处理较深松、翻耕处理能显著增加土壤0~20 cm土层中粘粒和粉粒含量，减少土壤风蚀作用；深松和秸秆还田处理能增加土壤颗粒的不均匀性，促进土壤结构稳定性增加。张邦彦[18]研究发现，粉垄耕作对土壤颗粒组成有显著影响，在0~20 cm、20~40 cm土层中粉垄耕作均显著提高了土壤粘粒含量；在40~60 cm土层中，显著减少了砂粒含量。因此，适宜的土壤耕作方式可以改变土壤粒径分布特征，改善土壤耕层结构，调节作物根系生长发育的土壤环境，进而提高作物产量和品质，具有重要的现实意义。

【本研究切入点】在广西甘蔗主栽区，由于土壤多为赤红壤，土壤结构差，且长期旋耕造成耕层变浅，犁底层上移，土壤水分养分流失严重，影响作物的生长发育，造成产量低而不稳[19-20]。因此，打破土壤犁底层，增加耕作层深度的关键是建立少耕长效机制，以往的研究多局限于传统旋耕、深翻耕、深松耕方式下对土壤理化性质、微生物、酶活性等方面的影响。然而对于新型的土壤耕作方式——粉垄耕作对土壤粒径分布特征等方面的影响尚不清楚。【拟解决的关键问题】针对我国南方旱坡地土壤耕作层浅薄、土壤保水保肥能力差、降雨利用率低等问题，以广西传统主栽农作物甘蔗为研究对象，分别设置粉垄耕作（FT）、旋耕（RT）、免耕（对照CK）3种不同的耕作方式。通过探究不同耕作方式对土壤粒度参数和粒度频率曲线的影响，旨在确定南方旱坡地适宜的耕作方式，为作物根系生长提供一个良好的土壤耕层结构，以期为农业的可持续发展提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年3—12月在广西壮族自治区钦州市水利灌溉试验站（22°08′N，108°77′E）进行，试验站位于广西西南部沿海地区，属亚热带海洋性气候，温暖湿润，该地区多年平均气温22~24 ℃，年平均降水量约1 600~2 000 mm，2022年月降雨量和月平均气温如图1~1所示，降水量时空分布不均，季节性较强，降水主要集中在6—9月，年均蒸发量1 600~1 800 mm。试验田种植坡度为8°，播种前各处理土壤基础养分状况基本一致（表1）。

表1 播前0~40 cm土壤性质

Tab.1 The soil fertility data in 0-40 cm soil layer before sowing

处理 Treatment	pH	有机质/（g·kg^{-1}） Organic matter	全氮/（g·kg^{-1}） Total nitrogen	铵态氮/（mg·kg^{-1}） Ammonium	硝态氮/（mg·kg^{-1}） Nitrate	有效磷/（mg·kg^{-1}） Available phosphorus	速效钾/（mg·kg^{-1}） Available potassium
0~10 cm	5.21	14.21	0.69	28.13	21.44	13.12	154.01
10~20 cm	5.13	10.28	0.60	25.50	20.23	9.99	118.26
20~40 cm	4.87	8.52	0.43	17.59	13.50	5.83	80.16

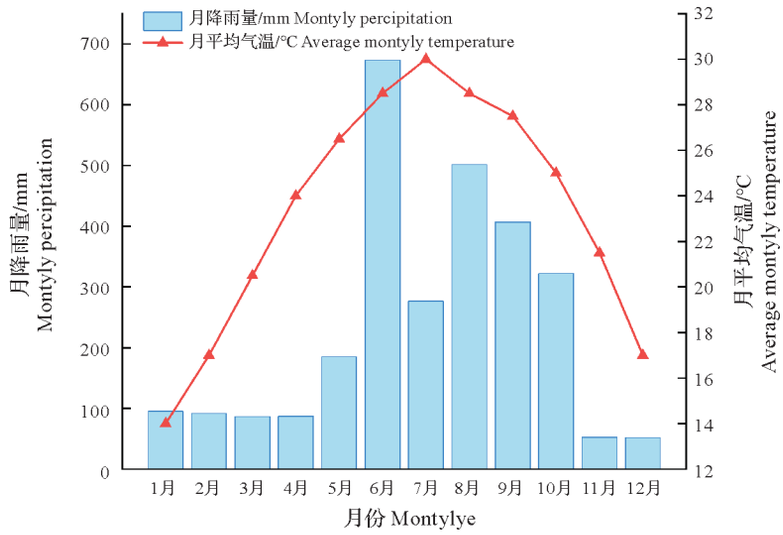


图 1　2023 年钦州市月平均气温和月降水量

Fig.1　Monthly average temperature and precipitation in 2023 in Qinzhou County

1.2　试验设计及田间管理

试验设置 3 种耕作方式:传统旋耕(RT,耕作深度 20 cm)和粉垄耕作(FT,粉垄深度 40 cm),以免耕(CK)为对照,共 3 个处理,完全随机排列,重复 3 次(图 2)。小区面积 36 m^2(6 m×6 m),各处理包括 3 个条带。甘蔗品种选用当地大面积推广种植品种:桂糖 44 号。为适应机械化发展,考虑农机农艺相结合,甘蔗种植株行距采用宽窄行种植(0.5+1.5)m,种植密度为 80 000 芽/hm^2。全生育期共灌水 6 次,灌水量为 1 500 m^3/hm^2;肥料用量参考当地农户种植经验,施肥量均为:N 300 kg/hm^2、P 150 kg/hm^2、K 240 kg/hm^2。肥料种类为:尿素(含 N 46%)、磷酸一铵(含 N-P_2O_5 12%~60%)和硫酸钾(含 K_2O 60%),全部随水滴施。其他田间管理按照大田生产实际进行。

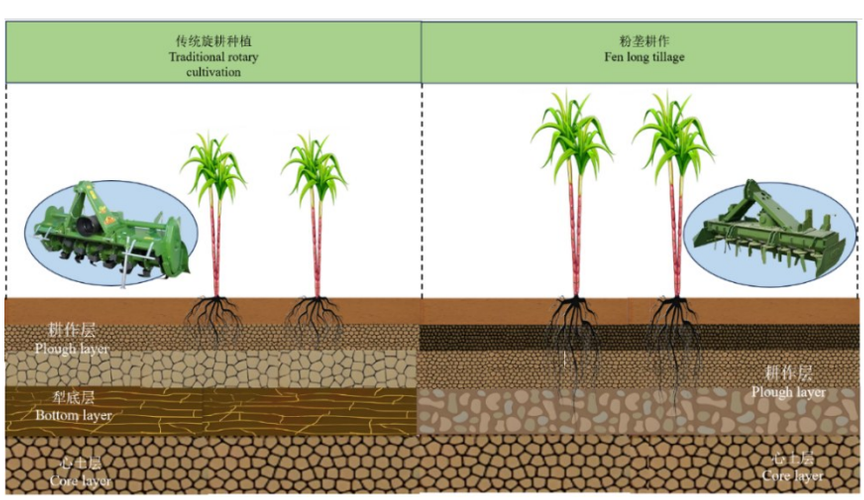


图 2　传统旋耕和粉垄耕作示意

Fig.2　Schematic diagram of conventional rotary tillage and Fenlong tillage

1.3　测定指标及计算方法

1.3.1　土壤养分含量测定

于甘蔗播种前进行五点取样,分别采集 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 深度的土壤,将采集的土壤样品分成 3 份自然风干过后,测定土壤基础养分含量。测定方法如下:土壤全氮(TN,g/kg)含量-凯氏定氮法、铵态氮($NH4^+$,mg/kg)-氯化钾浸提-靛酚蓝比色法和硝态氮(NO_3^-,mg/kg)含量、有效磷(AP,mg/kg)和速效钾(AK,mg/kg)含量-乙酸铵浸提-火焰分光光度法、土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定、土壤 pH 值采用 pH 计测定。

1.3.2 土壤粒度分析样品采集与测定

于甘蔗成熟期在甘蔗种植行间中间位置取样，用五点采样法分别采集0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm深度的土壤，每层土样分成3份，将采集的土壤样品自然风干过10目土筛后，采用激光粒度仪Bettersize2600测定土壤粒度。

1.3.3 土壤粒度指标

本试验根据美国的分级标准，将土壤粒径分为7个等级：黏粒（<0.002 mm）、粉粒（0.002~0.005 mm）、极细砂（0.005~0.01 mm）、细砂（0.01~0.25 mm）、中砂（0.25~0.5mm）、粗砂（0.5~1.0 mm）、极粗砂（1.0~2.0 mm）。根据土壤中各粒径级别的累积体积分数分别计算为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%的情况，以便计算粒度参数。

粒度分析方法采用Folk等[21]的粒级标准，并根据Krumbein[22]提出的对数转化法，计算Φ值的公式如下所示：

$$\Phi = -\log_2 d \tag{1}$$

式（1）中：d为土壤粒径直径（mm）

Φ_5、Φ_{16}、Φ_{25}、Φ_{50}、Φ_{75}、Φ_{84}、Φ_{95}是Krumbein[22]根据累积频率分布曲线的累积百分比，分别为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%对应的粒度进行对数转化所取得的值，据此计算粒度特征参数，公式如下。

平均粒径（d_0）：土壤中颗粒大小的平均水平。计算公式为：

$$d_0 = \frac{1}{3}(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \tag{2}$$

标准偏差（σ_0）：土壤中颗粒大小的分布范围，计算公式为：

$$\sigma_0 = \frac{1}{4}(\Phi_{84} - \Phi_{16}) + \frac{1}{6.6}(\Phi_{95} - \Phi_5) \tag{3}$$

偏度（S_0）：表达土壤粒度分布的对称性，计算公式为：

$$S_0 = \frac{(\Phi_{84} + \Phi_{16} - \Phi_{50})}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{(\Phi_{95} + \Phi_5 - \Phi_{50})}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \tag{4}$$

峰度（K_0）：反映土壤粒度集中程度，计算公式为：

$$K_0 = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \tag{5}$$

具体分级标准如表2。

表2 土壤粒度参数分级标准

Tab.2 Classification standards for soil particle size parameters

标准偏差 Standard deviation（σ_0）		偏度 Skewness（S_0）		峰度 Kurtosis（K_0）	
分选级别 Sorting Levels	取值范围 Value range	偏度等级 Skewness level	取值范围 Value range	峰度等级 Kurtosis level	取值范围 Value range
分选极好 Excellent sorting	$\sigma_0 \leqslant 0.35$	极负偏	$S_0 \leqslant -0.3$	很宽平	$K_0 \leqslant 0.67$
分选好 Good sorting	$0.35 < \sigma_0 \leqslant 0.50$	负偏	$-0.3 \leqslant S_0 \leqslant -0.1$	宽平	$0.67 < K_0 \leqslant 0.90$
分选较好 Better sorting	$0.50 < \sigma_0 \leqslant 0.71$	近于对称	$-0.1 \leqslant S_0 \leqslant 0.1$	中等	$0.90 < K_0 \leqslant 1.11$
分选中等 Medium sorting	$0.71 < \sigma_0 \leqslant 1.00$	正偏	$0.1 \leqslant S_0 \leqslant 0.3$	尖窄	$1.11 < K_0 \leqslant 1.56$
分选较差 Poorer sorting	$1.00 < \sigma_0 \leqslant 2.00$	极正偏	$0.3 \leqslant S_0 \leqslant 1.0$	很尖窄	$1.56 < K_0 \leqslant 3.00$
分选差 Poor sorting	$2.00 < \sigma_0 \leqslant 4.00$			极尖窄	$K_0 > 3.00$
分选极差 Ectremely sorting	$\sigma_0 > 4.00$				

1.4 数据处理

试验数据用Excel 2016进行统计，用SPSS 25.0对数据进行方差分析，并用LSD法对不同处理下的指标进行差异显著性比较（5%水平）。采用Origin 2024绘图。

2　结果与分析

2.1　不同耕作方式下土壤粒度组成

由表3可知,0~40 cm土层土壤粒度组成整体以中砂粒、细砂粒和粉粒为主,粘粒含量较低,其含量在2.49%~8.30%;粉粒含量变化范围在10.75%~32.39%;砂粒中,土壤粒径为0.1~0.25 mm的细砂粒含量最多。其次是中砂、极细砂和少量的粗砂。粉垄耕作中土壤粒度组成中粘粒和粉粒随着土壤深度的增加而增加,砂粒含量随着土壤深度的增加而减少,与旋耕和免耕处理变化趋势相反。

在0~10 cm土壤中,不同耕作处理下土壤粒度组成变化较大,其中粉垄耕作处理最为明显。粉垄耕作较免耕和旋耕处理显著降低土壤表层粘粒、粉粒、极细砂含量,增加细砂、中砂和粗砂含量;旋耕处理较免耕处理显著增加极细砂、细砂含量。在10~20 cm土壤中,粉垄耕作处理下粘粒、粉粒和极细砂粒较旋耕和免耕显著降低18.60%~21.66%、22.18%~35.77%和13.02%~44.70%;细砂和中砂含量较旋耕和免耕显著提高8.30%~15.46%、12.80%~15.35%。旋耕处理下粉粒、极细砂粒和细砂较免耕显著提高21.18%、57.28%和6.61%;中砂和粗砂含量较免耕显著降低54.95%~82.21%;粘粒差异不显著。在20~40 cm土壤中,粉垄耕作处理下粘粒和粉粒较旋耕和免耕显著增加45.63%~112.44%和27.76%~46.99%;极细砂和细砂含量较旋耕显著降低21.77%、16.03%;中砂和粗砂含量较免耕显著降低29.73%、74.46%。

表3　不同耕作方式下0~40 cm土壤粒度分布

Tab.3　Soil particle size distribution from 0–40 cm under different tillage practices

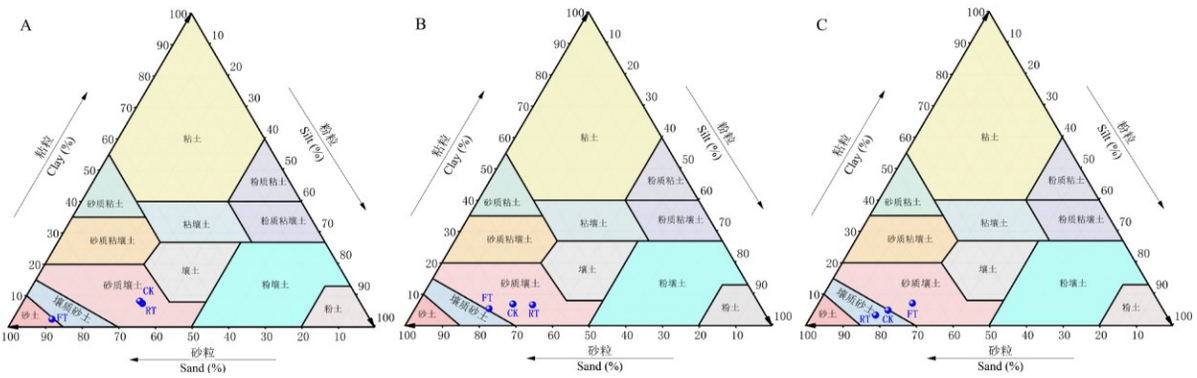
土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	土壤粒径占比/% Percentage of soil particle size					
		粘粒 Clay	粉粒 Silt	极细砂 Extremely fine sand	细砂 Fine sand	中砂 Medium sand	粗砂 Coarse sand
0–10	FT	2.49±0.61^{b}	10.75±0.15^{b}	8.68±0.13^{c}	49.60±1.02^{a}	27.24±1.27^{a}	1.24±0.09^{a}
	RT	7.47±0.10^{a}	32.39±0.93^{a}	16.73±0.96^{a}	37.37±0.14^{b}	5.34±0.23^{c}	0.70±0.50^{ab}
	CK	8.30±0.73^{a}	31.70±0.27^{a}	11.30±0.85^{b}	33.67±1.30^{c}	14.68±0.88^{b}	0.35±0.05^{b}
10–20	FT	5.41±0.54^{b}	20.20±0.23^{c}	8.33±0.37^{c}	39.69±1.18^{a}	25.09±0.82^{a}	1.28±0.31^{a}
	RT	6.65±0.24^{a}	31.45±0.27^{a}	15.06±0.23^{a}	36.65±0.05^{b}	10.02±0.20^{c}	0.17±0.03^{b}
	CK	6.91±0.27^{a}	25.96±0.35^{b}	9.57±0.14^{b}	34.38±0.06^{c}	22.25±0.28^{b}	0.94±0.14^{a}
20–40	FT	7.12±0.19^{a}	25.58±0.45^{a}	9.96±0.32^{b}	39.10±0.08^{b}	17.82±0.47^{b}	0.44±0.10^{b}
	RT	3.35±0.28^{c}	17.40±0.89^{c}	12.73±0.14^{a}	46.56±0.53^{a}	19.27±1.68^{b}	0.69±0.16^{b}
	CK	4.89±0.25^{b}	20.02±0.3^{b}	10.07±0.23^{b}	37.95±0.29^{c}	25.37±0.49^{a}	1.71±0.11^{a}

FT、RT和CK分布代表粉垄耕作、旋耕和免耕处理,不同小写字母表示同一土层不同耕作方式下土壤各粒度组成之间差异显著(P<0.05)。

FT, RT and CK distributions represent chalk tillage, rotary tillage and no-tillage treatments. Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05) between the various grain size compositions of soil under different tillage practices in the same soil layer.

2.2　不同耕作方式下土壤质地的影响

从图3中可以看出,各处理0~40 cm土层的土壤质地类型可以划分为砂土、壤质砂土和砂质壤土。在0~10 cm土层中,粉垄耕作与旋耕和免耕相比较,改变了土壤表层土的土壤质地类型,由砂质壤土变为砂土,显著降低粘粒和粉粒的含量;这与土壤粒度分布变化保持一致。在旋耕和免耕处理中,二者土壤质地类型一致且粒径含量相近。在10~20 cm土层中,粉垄耕作、旋耕和免耕处理中的土壤质地类型均为砂质壤土,其中土壤粒径含量表现为砂粒:粉垄耕作>免耕>旋耕;粉粒:旋耕>免耕>粉垄耕作;粘粒:免耕>旋耕>粉垄耕作。在20~40 cm土层中,旋耕和免耕处理中的土壤质地类型均为壤质砂土,粉垄耕作处理的土壤质地类型为砂质壤土,分析其原因可能是由于粉垄耕作打破土壤犁底层,营造出一个虚实结合的土壤环境,减少了0~20cm土层中粘粒和粉粒的含量,使之通过土壤颗粒沉降等方式在20~40 cm土层中。



FT、RT和CK分布代表粉垄耕作、旋耕和免耕处理(n=3)。A、B和C分别代表各处理0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm的土壤质地。

FT, RT, and CK distributions represent chalk tillage, rotary tillage, and no-tillage treatments (n=3). A, B and C respectively represent the soil texture of 0~10 cm, 10~20 cm, and 20~40 cm for each treatment.

图3 不同耕作方式下土壤质地三角

Fig.3 Soil texture ternary diagram under different tillage methods

2.3 不同耕作方式下土壤粒度参数变化特征

从表4可以看出,土壤平均粒径在粉垄耕作处理中随着土壤深度的增加而逐渐增加;在旋耕和免耕处理中随着土壤深度的增加呈现出先“V”字形变化规律,这可能与各处理的耕作作业深度有关。各处理的土壤粒度标准偏差为-2.64~-1.54,整体分选极好。土壤粒度偏度值为-1.25~-1.04,整体上土壤偏度为极负偏,表明土壤粒度中粗粒物质占比远大于细粒物质;整体上土壤峰度为0.57~1.08,所对应的土壤峰度等级在很宽平和中等之间,且随着土壤深度的增加土壤峰度等级趋于宽平。

表4 不同耕作方式下土壤粒度参数

Tab.4 Soil particle size parameters under different tillage methods

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	平均粒径 Average particle size(d_0)	标准偏差 Standard skewness(σ_0)	偏度 Skewness(S_0)	峰度 Kurtosis(K_0)
0~10	FT	2.66±0.01^{c}	−1.54±0.04^{a}	−1.25±0.00^{c}	1.08±0.00^{a}
	RT	4.58±0.05^{a}	−2.44±0.06^{b}	−1.12±0.01^{b}	0.73±0.02^{b}
	CK	4.43±0.07^{b}	−2.64±0.09^{c}	−1.04±0.00^{a}	0.71±0.00^{b}
10~20	FT	3.68±0.05^{a}	−2.41±0.04^{c}	−1.09±0.00^{a}	0.78±0.01^{b}
	RT	3.26±0.04^{b}	−1.85±0.06^{b}	−1.17±0.00^{b}	0.93±0.01^{a}
	CK	2.96±0.04^{c}	−1.78±0.07^{a}	−1.19±0.00^{c}	0.57±0.00^{c}
20~40	FT	4.13±0.06^{b}	−2.57±0.09^{b}	−1.09±0.01^{a}	0.71±0.00^{b}
	RT	4.37±0.04^{a}	−2.47±0.08^{ab}	−1.09±0.00^{a}	0.76±0.00^{a}
	CK	3.53±0.07^{c}	−2.33±0.08^{ab}	−1.09±0.00^{a}	0.76±0.00^{a}

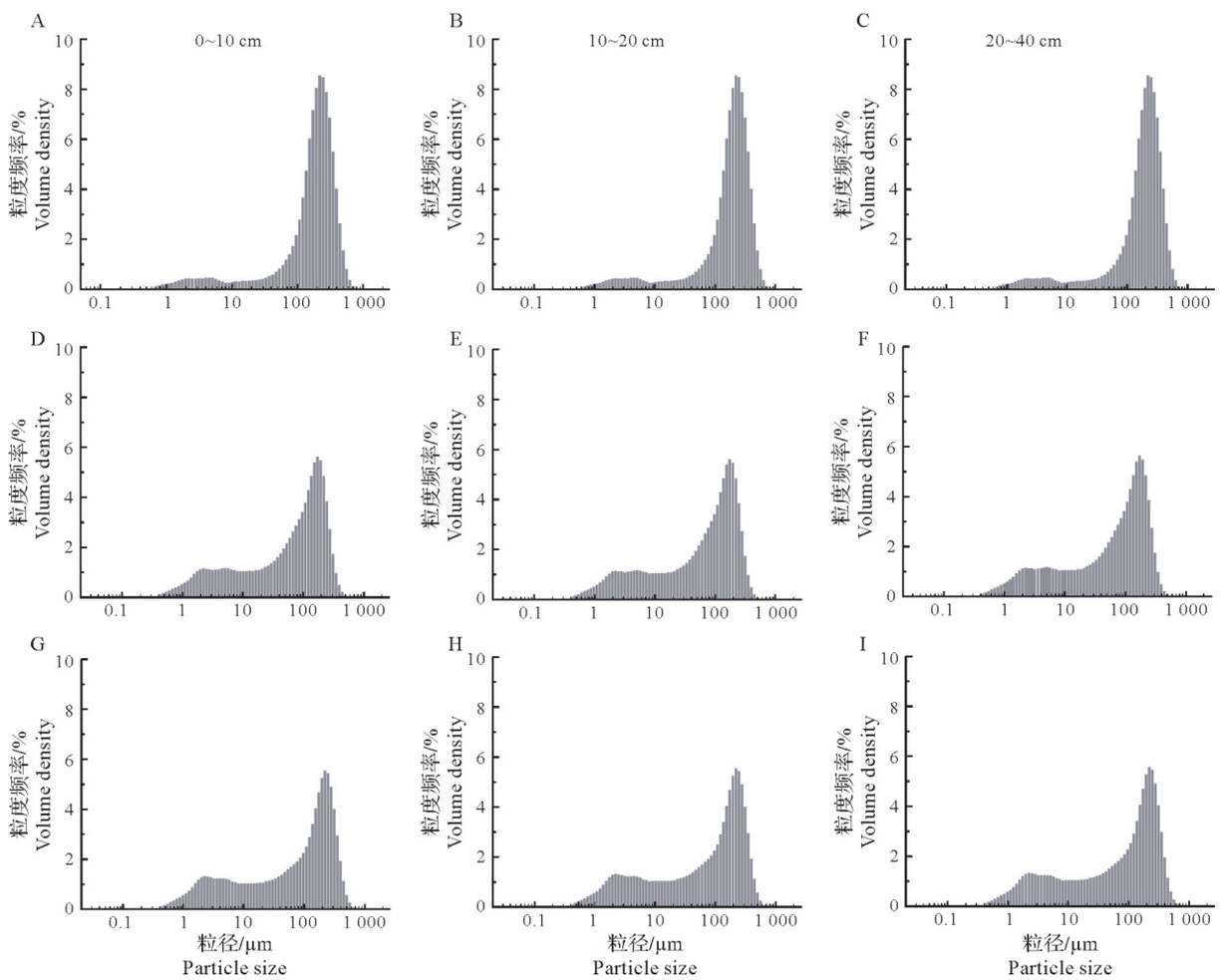
不同小写字母表示同一土层不同耕作方式下土壤各粒度参数之间差异显著(P<0.05)

Different lower case letters indicate significant differences (P<0.05) between soil particle size parameters for different tillage practices in the same soil layer

在0~10 cm土层中,各处理间平均粒径差别较大,范围在2.66~4.58 mm;其中旋耕>免耕>粉垄耕作;粉垄耕作土壤粒度标准偏差分选最好,表现为粉垄耕作>免耕>旋耕;土壤粒度偏度表现为免耕>旋耕>粉垄耕作;粉垄耕作土壤峰度>0.9,土壤峰度等级中等,说明粉垄耕作条件下土壤粒度分布较为集中。在10~20 cm土层中,不同耕作方式下土壤平均粒径变化范围在2.96~3.68,粉垄耕作最高(3.68);旋耕和免耕较上一土层平均粒径降低,标准偏差旋耕分选级别最好(-1.78),与粉垄耕作仅相差0.07,表现为旋耕>粉垄耕作>免耕;土壤粒度偏度与0~10 cm土壤相反,表现为粉垄耕作>旋耕>免耕。土壤峰度表现为旋耕>粉垄耕作>免耕;在20~40 cm土层中,各处理平均粒径较上一土层均显著增加,表现为:旋耕>粉垄耕作>免耕,出现土壤粒度粗化的情况。土壤粒度标准偏差整体要低于10~20 cm土层,但处理间没有差异。其中免耕分选最好,表现为免耕>旋耕>粉垄耕作。土壤粒度偏度一致,无显著差异;土壤峰度等级均为宽平。

2.4　不同耕作方式下土壤粒度频率分布特征

由图4可知,在0~40 cm土层中,各处理土壤粒度频率曲线变化一致。粉垄耕作处理中各土层土壤粒度曲线呈单峰态分布,峰值高度远高于旋耕和免耕处理,峰值范围位于0.15~0.4 mm,显著改变土壤中粒度分布频率,显著增加0.15~0.4 mm粒径的占比,使得土壤粒度分布更加集中;旋耕和免耕处理中土层土壤粒度曲线呈双峰态分布,且峰值高度之间差异较大,第1个峰值范围分布分别位于0.003~0.008 mm和0.001~0.006 mm;第2个峰值位分别于0.1~0.3 mm和0.1~0.35 mm。且旋耕处理中土壤粒度频率分布曲线斜率小于免耕处理,证明旋耕耕作使得土壤的粒度频率分布占比较为分散,土壤粒度比免耕处理更均一。



A、B和C代表粉垄耕作各深度土壤粒度频率分布;D、E和F代表旋耕各深度土壤粒度频率分布;G、H和I代表免耕各深度土壤粒度频率分布。

A, B, and C represent soil particle size frequency distributions by depth for Fenlong tillage; D, E, and F represent soil particle size frequency distributions by depth for rotary tillage; and G, H, and I represent soil particle size frequency distributions by depth for no-tillage.

图4　不同耕作方式下土壤粒度频率分布特征

Fig.4　Effect of different planting slope conditions on sugarcane quality indicators

2.5　不同耕作方式下土壤粒度累计频率分布特征

由图5可知,同一土层不同耕作方式下土壤的粒度累积频率分布曲线,各样地的曲线斜率相近,曲线的陡度表示颗粒分布的均匀性,各土层曲线均在0.1~0.35 mm间逐渐变陡。随着土层的加深,土壤粒度累计频率曲线逐渐趋于一致。在0~10 cm土层中,粉垄耕作较旋耕和免耕处理减少了0.001~0.1 mm的土壤粒度累计频率,且粉垄耕作坡度最大,说明土壤颗粒绝大部分存在于0.1 mm以后;在10~20 cm土层

中，粉垄耕作和旋耕处理曲线较为一致，同时在粒径为0.001~0.1 mm范围中，土壤粒度累计频率表现为：免耕>粉垄耕作>旋耕，说明粉垄耕作和旋耕使得土壤粗粒增多。在20~40 cm土层中，各处理中土壤粒度累计频率相近，且斜率也较一致，整体差异不大。

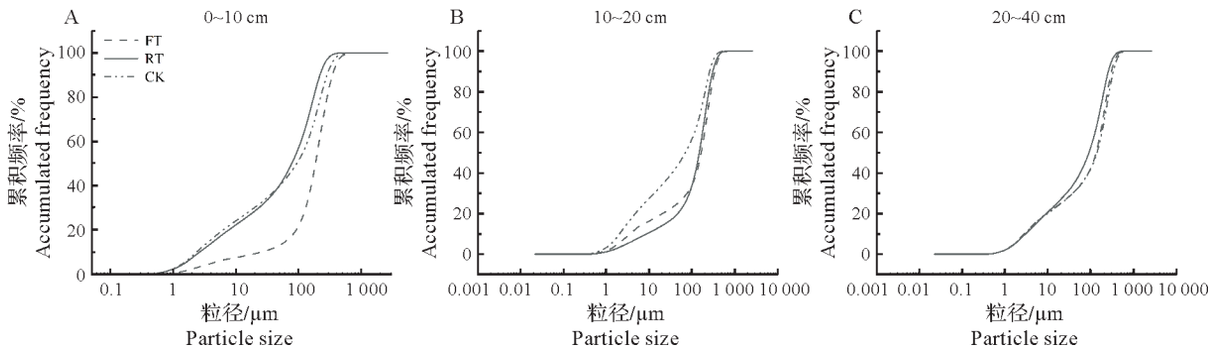


图5 不同耕作方式下土壤粒度累计频率分布

Fig.5 Effect of different planting slope conditions on sugarcane quality indicators

3 讨 论

3.1 不同耕作方式对土壤粒度组成和质地的影响

土壤颗粒组成直接影响土壤的入渗特性和肥力养分状况，同时与土壤的侵蚀和退化密切相关，因此是土壤物理特性中至关重要的一部分[23-26]。本研究对不同耕作方式土壤粒径进行分析可知，各处理中土壤均以细砂含量最高，为33.67%~49.60%，粗砂含量最低，为0.35%~1.71%，土壤颗粒各粒级比例差异较大；粉垄耕作显著降低了土壤表层粘粒和粉粒含量，随着土壤深度的增加，土壤中粘粒和粉粒逐渐在更深土层中累积，粉垄耕作处理中各土层（0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm）的土壤质地类型为砂土、壤质砂土、砂质壤土；免耕处理中各土层（0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm）的土壤质地类型为砂质壤土、砂质壤土、壤质砂土。说明南方赤红壤土在免耕处理下能增加土壤粘粒和粉粒，在一定程度上能减少水土流失[27-29]。其原因可能是由于土壤免耕处理减少了土壤表层土的扰动，动植物残体主要集中在表层土中，为土壤中微生物的生命活动提高养分与原料，从而使得表层土壤中微生物生长代谢旺盛，在促进土壤有机质形成的同时，还能够使得土壤中的大颗粒矿化分解，增加土壤中细小颗粒。而粉垄耕作由于是在水平方向上的耕作，且耕作深度较深，土层内部结构虚实结合，但随着降雨冲刷等原因导致土壤表层土中粘粒和粉粒在下层累积[30-32]。这与王少博等[17]研究在不同耕作方式下土壤深松处理均较免耕处理降低了土壤0~10 cm和10~20 cm土层中粘粒和粉粒含量的研究结果相一致。同时本研究利用Krumbein[22]分别计算了各处理的平均粒径（d_0）、粒度标准偏差（σ_0）、偏差（S_0）和峰度（K_0），并根据其提出的粒度参数评价标准进行分析（表4）。土壤粒度标准偏差分选等级极好，土壤偏度均<-1，整体为极负偏，表现为土壤粗粒物质大于细粒物质，与土壤粒径分布结果一致。土壤峰度等级在中等和很宽平之间，证明土壤样本的选取能够代表各处理下土壤粒径分布特征。

3.2 不同耕作方式对土壤粒度频率和累积频率的影响

进一步对不同耕作方式下土壤粒度频率分布曲线和累积频率分布曲线分析后可知，本研究中，旋耕和免耕处理土壤粒径分布特征均为双峰形，土壤粒度分布较为分散，且峰值高度之间差异较大，第1个峰值范围分布位于0.003~0.008 mm和0.001~0.006 mm；第2个峰值位于0.1~0.3 mm和0.1~0.35 mm；粉垄耕作土壤粒径分布特征均为单峰形；土壤粒度分布较为集中，且峰值高度远高于旋耕和免耕处理。表明粉垄耕作使得土壤粒径分布更加集中，促进土壤的不均匀性。其原因是粉垄耕作不翻转土壤，但能够打破犁底层，形成虚实并存的土壤结构。这种结构有助于土壤气体的交换，创造出疏松且深厚的土壤环境，有利于作物根系生长。此外，它还促进了微生物的活化和矿物质分解，并增加了土壤颗粒的不均匀性，土壤结构稳定性增强[25]。王少博等[17]研究表明，深松秸秆还田处理加剧了土壤的非均匀程度，增强了土壤结构的稳定性。土壤颗粒分布越不均匀，土壤结构的稳定性就越强。深松秸秆还田有助于促进土壤

结构的稳定性。付东升等[33]研究表明,在农牧交错带上,与天然草地相比,不同耕作方式下使得土壤粒径分布范围增大,土壤粒径整体趋于粗粒化,进而使得农田表层土壤耕作层土壤粗化,这些均与本研究结果基本吻合。

4　结　论

(1)不同耕作方式下土壤粒度组成各土层均以中砂粒、细砂粒、粉粒为主,占比达到总量的75%~87%,粉垄耕作较旋耕和免耕处理显著减少0~10 cm土壤中粘粒和极细砂含量。土壤粒度组成由细到粗为:免耕>旋耕>粉垄耕作。各处理不同土层的土壤质地主要以砂质壤土或壤质砂土为主,平均粒径为2.66~4.43 mm。土壤整体分选性极好,偏度均表现为极负偏,峰度属于宽平和中等之间。

(2)不同耕作方式对土层的扰动变化程度直接影响着土壤粒径分布特征,试验中粉垄耕作处理使土壤粒径分布频率曲线由双峰分布变为单峰分布,且峰值高度和峰值范围对应粒径大小也远高于旋耕和免耕处理;各粒度参数显示粉垄耕作和旋耕处理引起土壤粒径的增大,且粉垄耕作较为明显,土壤粒径分布范围小(0.15~0.4 mm),粒径整体趋于粗粒化。

参考文献 References:

[1] 吴建明,李燕娇,邓宇驰,等.中国甘蔗栽培的研究进展[J].广西科学,2022,29(4):613-626.
WU J M,LI Y J,DENG Y C,et al.Research progress in sugarcane cultivation in China[J].Guangxi sciences,2022,29(4):613-626.

[2] SOLANK M K,WANG Z,WANG F Y,et al.Intercropping in sugarcane cultivation influenced the soil properties and enhanced the diversity of vital diazotrophic bacteria[J].Sugar tech,2017,19:136-147.

[3] 刘莹.甘蔗磷高效根系形态构型特征及吸收转运磷机制研究[D].南宁:广西大学,2021.
LIU Y.Study on phosphorus efficiency mechanisms in root morphological and architecture characteristics and phosphorus uptake and transport in sugarcane[D].Nanning:Guangxi University,2021.

[4] 覃泽林,孔令孜,李小红,等.广西蔗糖产业技术研究进展[J].广东农业科学,2014,41(12):195-199.
QIN Z L,KONG L Z,LI X H,et al.Research advances in technology of sugarcane industry in Guangxi[J].Guangdong agricultural science,2014,41(12):195-199.

[5] 王鑫.气候变化对广西农业的影响及其适应研究[D].桂林:广西师范学院,2017.
WANG X.A study on impacts of climate change on agriculture in Guangxi and its adaptation[D].Guilin:Guangxi Normal University,2017.

[6] 苏永中,杨荣,刘婷娜.施肥对新垦绿洲风沙土肥力及碳积累的影响[J].中国沙漠,2019,39(3):1-6.
SU Y Z,YANG R,LIU T N.Effects of long-term different fertilization on soil fertility and soil organic carbon accumulation in psamments of oasis farmland[J].Journal of desert research,2019,39(3):1-6.

[7] 郑顺安,刘代丽,章明奎,等.长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):354-359.
ZHENG S A,LIU D L,ZHAN M K,et al.Effects of long-term straw return on heavy metals of soil and agricultural products of polluted farmland[J].Journal of soil and water conservation,2020,34(2):354-359.

[8] 张鑫,宁小莉,佟宝全.阴山北麓农牧交错区居民点空间分异特征:以包头市达尔罕茂明安联合旗为例[J].干旱区资源与环境,2020,34(5):78-84.
ZHANG X,NING X L,TONG B Q.Spatial differentiation of residential areas in the farming-pastoral ecotone on the north foot of Yinshan Mountain[J].Journal of arid land resources and environment,2020,34(5):78-84.

[9] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J].干旱区研究,2014,31(4):636-642.
GE Y X,JILILI A,MA L,et al.Response of granularity distribution to wind erosion in the plays of the Ebinur Lake,Xinjiang,northwest China[J].Arid zone research,2014,31(4):636-642.

[10] 王燕,斯庆毕力格,贾旭,等.基于多重分形的半干旱区弃耕农田土壤粒径分布特征[J].干旱区研究,2018,35(4):

804-812.

WANG Y, STRING B, JIA X, et al.Particle size distribution of soil on abandoned farmland in semiarid areas based on multi-fractals[J].Arid zone research, 2018, 35(4): 804-812.

[11] 李王成, 马东祥, 贾振江, 等. 砾石覆盖下的农田土壤环境效应: 研究进展与展望[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(2): 278-288.

LI W C, MA D X, JIA Z J, et al.Soil environmental effects of gravel-sand mulched field: research progress and prospects[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(2): 278-288.

[12] 劳承英, 黄渝岚, 李艳英, 等. 粉垄耕作深度和间作大豆对木薯产量及效益的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(1): 28-36.

LAO C Y, HUANG Y L, LI Y Y, et al.Effects of fen-long plowing depth and intercropping of soybean on cassava yield and benefit[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(1): 28-36.

[13] 韦本辉, 申章佑, 甘秀芹, 等. 粉垄栽培对旱地作物产量品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2012, 14(4): 101-105.

WEI B H, SHEN Z Y, GAN X Q, et al.Effects of Fenlong cultivation on yield and quality of dryland crops[J].Journal of agricultural science and technology, 2012, 14(4): 101-105.

[14] 杨博. 粉垄耕作对盐碱地土壤性质及耐盐碱高粱生长的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.

YANG B.Study on the effect of smash ridging on soil properties in saline alkali soil and growth of saline alkali tolerant sorghum[D].Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.

[15] 王世佳, 蒋代华, 朱文国, 等. 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 S J, JIANG D H, ZHU W G, er al .Effect of deep vertical rotary tillage on aggregate structure in farmland of lateritic red soil[J].Acta pedologica Sinica, 2020, 57(2): 326-335.

[16] 刘江汉. 粉垄耕作对土壤性质及马铃薯生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.

LIU J H.Effect of smash-ridging tillagen on soil properties and potato growth[D].Yinchuan: Ningxia University, 2019.

[17] 王少博, 曹亚倩, 冯倩倩, 等. 保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 792-804.

WANG S B, CAO Y Q, FENG Q Q, et al.Impacts of conservation tillage on soil particulate composition and distribution of soil carbon and nitrogen in brown soil[J].Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(5): 792-804.

[18] 张邦彦. 粉垄与覆膜对宁南旱区土壤理化性质、水氮利用效率及马铃薯产量的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.

ZHANG B Y.Effects of smashing ridge tillage and film mulching on soil physicochemical properties, water and nitrogen use efficiency and potato yield in arid regions of southern Ningxia[D].Yinchuan: Ningxia University, 2020.

[19] 李荣, 鄢慧芳, 张龙, 等. 不同耕作措施对宁南地区土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(18): 3543-3555.

LI R, YAN H F, ZHANG L, et al.Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in the region of southern Ningxia[J].Scientia agricultura Sinica, 2023, 56(18): 3543-3555.

[20] 刁朝强, 邓兆权, 林松, 等. 不同耕作方式及耕地深度对贵阳植烟土壤及烤烟质量的影响[J]. 江西农业学报, 2019, 31(5): 70-78.

DIAO C Q, DENG Z Q, LIN S, et al.Effects of different tillage methods and tillage depths on tobacco-planting soil and flue-cured tobacco quality in Guiyang[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 31(5): 70-78.

[21] FOLK R L, WAED W C.A study in the significance of grain-size parameters[J].Journal sedimentary petrology, 1957, 27(1): 3-26.

[22] KRUMBEIN W C.Size frequency distribution of sediments[J].Journal of sedimentary research, 1934, 4(2): 65-77.

[23] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.

SU Y Z, ZHAO H L.Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land[J].Acta ecologica Sinica, 2004, 24(1): 71-74.

[24] 樊立娟, 胡广录, 廖亚鑫, 等. 河西走廊斑块植被区表层土壤粒径及其分形维数的空间变异特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1068-1075.

FAN L J, HU G L, LIAO Y X, et al.Spatial variability of soil particle size and its fractal dimension of patchy vegetation in

Hexi Corridor[J].Arid zone research,2015,32(6):1068-1075.

[25] 郭挺,徐先英,柴成武,等.民勤绿洲-荒漠过渡带微区土壤水分及粒度特征研究[J].中国农学通报,2015,31(5):157-163.
GUO T,XU X Y,CHAI C W,et al.Soil moisture and grain size characteristic of micro-area in oasis-desert of Minqin[J].Chinese agricultural science bulletin,2015,31(5):157-163.

[26] SUN C L,LIU G B,XUE S.Natural succession of grassland on the Loess Plateau of China affects multifractal characteristics of soil particle-size distribution and soil nutrients[J].Ecological research,2016,31(6):891-902.

[27] 陈强,KRAVCHENKO Y S,陈渊,等.少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果[J].土壤学报,2014,51(1):11-21.
CHEN Q,YURIY S K,CHEN Y,et al.Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage[J].Acta pedologica Sinica,2014,51(1):11-21.

[28] PERFECT E,KAY B D.Applications of fractals in soil and tillage research:a review[J].Soil and tillage research,1995,36(1/2):1-20.

[29] 胡宏昌,田富强,胡和平.新疆膜下滴灌土壤粒径分布及与水盐含量的关系[J].中国科学:技术科学,2011,41(8):1035-1042.
HU H C,TIAN F Q,HU H P,et al.Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J].Scientia Sinica(technologica),2011,41(8):1035-1042.

[30] MOHAMMADI M H,MESKINI-VISHKINI F.Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data[J].Pedosphere,2013,23(1):70-80.

[31] HU H C,TIAN F Q,HU H P.Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J].Science China technological sciences,2011,54:1568-1574.

[32] 童春元,李钢铁,卢立娜,等.杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征[J].水土保持通报,2019,39(5):308-315.
TONG C Y,LI G T,LU L N,et al.Distribution of soil size and fractal characteristics under low-inefficiency poplar forests[J].Bulletin of soil and water conservation,2019,39(5):308-315.

[33] 付东升,任晓萌,王燕玲,等.农牧交错带不同利用方式土壤粒径分布特征:以呼和浩特市武川县为例[J].干旱区研究,2022,39(4):1322-1332.
FU D S,REN X M,WANG Y L,er al .Distribution characteristics of soil particle size in farming-pastoral ecotone:a case study of Wuchuan County in Inner Mongolia[J].Arid zone research,2022,39(4):1322-1332.