

2 种典型耕作方式影响下的蔗田土壤孔隙结构及其水分运动特性

刘俊杰^{1,4}, 陈晓冰^{1,2}, 秦梓城^{3,4}, 刘思佳^{3,4}, 许昊^{3,4}, 杨婷^{3,4}

- (1.桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004;
2.桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;
3.广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地, 广西 桂林 541004;
4.桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了明确农业生产过程中耕作方式对田间土壤孔隙结构及土壤水分运动特性的影响,以广西农地蔗田为研究对象,基于土壤切片技术分析研究免耕和垄耕 2 种典型耕作方式蔗田的田间土壤孔隙结构特征,并结合土柱模拟入渗试验,探究土壤孔隙结构对土壤水分运动的影响,进一步揭示孔隙结构与土壤水分运动特性之间的相互作用关系。结果表明:随着土层深度的增加,免耕蔗田孔隙形态以聚集的团块状分布为主,垄耕蔗田孔隙形态以条状分布为主。与免耕蔗田相比,垄耕蔗田的土壤总孔隙度和 $>2.5\text{ mm}$ 孔径的孔隙度分别增加 32.5%和 21.9%。垄耕蔗田在局部土层深度范围内显著增加上下土层孔隙的变异度($p<0.05$),显著降低土壤孔隙的连通性(平均邻近指数为 0.448)($p<0.05$),土壤孔隙形态相对规则(平均成圆率为 0.335)。对于土壤水分运动特性,免耕蔗田总体的土壤饱和导水率和质量流率显著高于垄耕蔗田($p<0.05$),初始含水率显著低于垄耕蔗田($p<0.05$),质量流率随时间变化强度相对较大,提高水流入渗能力。垄耕降低土壤孔隙结构连通性,使水分蓄存在表层土壤中,一定程度上可降低土壤水分的入渗现象,改变蔗田土壤水分状况。

关键词: 耕作方式; 土壤切片; 土壤孔隙结构; 土壤水分状况

中图分类号: S152.5; S566.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0237-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.027

Soil Pore Structure and Water Movement Characteristics of Sugarcane Field Under the Influence of Two Typical Tillage Methods

LIU Junjie^{1,4}, CHEN Xiaobing^{1,2}, QIN Zicheng^{3,4}, LIU Sijia^{3,4}, XU Hao^{3,4}, YANG Ting^{3,4}

- (1.Guilin University of Technology, Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guilin University of Technology, Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin, Guangxi 541004; 3.Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology for Science and Education Combined with Science and Technology Innovation Base, Guilin, Guangxi 541004;
4.Guilin University of Technology, College of Environmental Science and Engineering, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract: In order to clarify the effects of tillage methods on soil pore structure and soil water movement characteristics during agricultural production, sugarcane field in Guangxi was taken as the research object, soil pore structure characteristics of sugarcane field under two typical tillage methods of no-tillage and ridge tillage were studied based on soil slicing technique, combined with simulated infiltration test of soil column, the influence of soil pore structure on soil water movement was explored, and the interaction between pore structure and soil water movement characteristics was further revealed. The results showed that with the increase of soil layer depth, the pore morphology of no-till sugarcane field was dominated by aggregated clumps, while the pore morphology of ridge tillage sugarcane field was dominated by strip distribution. Compared with no-till sugarcane field, the total porosity and porosity of the soil with $> 2.5\text{ mm}$ pore size

increased by 32.5% and 21.9%, respectively, in ridge tillage sugarcane field. In the range of local soil depth, the ridge cultivated land significantly increased the porosity variation of the upper and lower soil layers ($p < 0.05$), and significantly decreased the connectivity of soil pores (average proximity index was 0.448) ($p < 0.05$), the soil pore morphology was relatively regular (average pore roundness was 0.335). As for the soil water movement characteristics, compared with the ridge tillage sugarcane field, the overall soil saturated hydraulic conductivity and mass flow rate in no-till sugarcane field were significantly higher ($p < 0.05$), while the initial water content was significantly lower ($p < 0.05$). The change intensity of mass flow rate over time was relatively large, which improved the water infiltration capacity. Compared with no-tillage, the ridge tillage of sugarcane field reduced the connectivity of soil pore structure and resulted in water separation and storage in the surface soil, thus could reduce the infiltration of soil water to a certain extent, which was helpful to improve the soil water condition of sugarcane field.

Keywords: tillage method; soil thin section; soil pore structure; soil moisture regime

广西是目前我国最大的甘蔗种植区,2021 年种植面积达 77.48 万 hm^2 ^[1]。近年来,在全球气候变化的大背景下,甘蔗种植区内降水季节分配不均,高温干旱等^[2]气象灾害频发,再加之蔗区土壤肥力水平偏低^[3]等问题,导致土地生产力水平下降,一定程度上影响了甘蔗的产量。因此,采取有效措施开展蔗田土壤肥力的提升,对于增加地方农民收入,保障食糖供应稳定具有重要的现实意义^[4]。研究^[5]发现,利用合理的土壤耕作措施,通过改变耕层的土壤结构等土壤性状,对田间的水、肥、气、热等产生影响,提升土壤肥力与土壤健康的同时,可达到作物增产提质的目的,在农业生产中发挥着重要的作用。

不同的耕作方式对土壤扰动影响的程度不同,进而改变土壤结构、理化性状、水分、微生物等^[6]形成不同的土壤环境状况。其中,针对土壤结构相关研究主要集中在揭示土壤孔隙结构和土壤团聚体结构^[7]来反映不同耕作方式对田间土壤环境的影响,而耕作扰动后的土壤要素是否导致土壤结构变化,耕作方式引起的土壤结构改变对土壤环境各要素产生影响程度如何,对于深入揭示耕作方式改良土壤的作用机理十分重要。同时,以土壤含水量、土壤入渗率等^[8-9]土壤水分状况,或通过染色^[10]、水分与溶质迁移^[11]等研究来反映耕作方式对水分运动的影响研究中较少直接涉及土壤结构变化下的影响作用分析,而研究^[12]发现土壤结构对田间水分与养分的分布、输移具有重要的作用。因此,阐明耕作方式影响下的土壤结构与水分运动之间的作用关系,有助于全面认识耕作方式改良土壤的效果。

当前,随着数字图像技术的发展与应用,广泛通过土壤切片^[13-14]、染色示踪^[15]、X 射线电子计算机断层扫描(CT)^[16]、电镜扫描(SEM)^[17]等技术手段来获取土壤结构信息。其中,土壤切片技术除可以获得反映土壤结构的孔隙组成、大小、数量等^[13]特征数据

以外,还可以结合图像形态学分析方法,综合揭示土壤孔隙结构的分布、形态等^[14]信息。综上,本文利用土壤切片技术,并结合土柱入渗试验,采用图像形态学分析、土壤水分入渗模拟等方法对广西典型耕作方式(免耕和垄耕)下蔗田的土壤孔隙结构状况进行分析,并探究土壤孔隙结构对田间土壤水分运动变化状况的影响,以期改善蔗田土壤环境,指导广西甘蔗生产调控提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西来宾市武宣县(23°45′34″N, 109°38′54″E),属于亚热带季风气候,年均降水量 1 319.5 mm,年均气温 22.1 ℃。土壤主要类型是红壤和石灰土,土壤质地组成以黏壤土和粉黏壤土为主。研究区蔗田已实施的耕作年限为 3 年。本研究的试验时间为 2021 年 12 月至 2022 年 1 月。

1.2 样地选择与布设

在研究区内选择 2 块相邻且长宽均分别为 36, 30 m 的蔗田作为研究样地,并在甘蔗种植前,分别对样地进行垄耕和免耕处理。其中,垄耕是对样地进行起垄(高 0.15 m)翻作处理;免耕不做任何处理。

1.3 土壤样品采集

为保证同种试验样地土壤具有相似的水分状况,试验前 1 星期至采样结束均无降雨发生。在 2 种耕作方式蔗田的种植行间随机选取 3 块土壤样品采集区,将土壤表面的枯叶等清除干净。选用外径 110 mm、高 60 cm 的 PVC 塑料管,将管口一端打磨成薄刃状置于土壤表面,自上而下共制取 12 根 50 cm 土壤深度的原状土柱,其柱内土壤表面距离土柱顶端 10 cm。其中,用于土壤切片试验和土柱入渗试验的原状土柱各 6 根。同时,距离土柱采集区 15 cm 处沿土壤深度以 10 cm 为间距使用手持 TDR 水分测定仪测定各层土壤初始含水率。此外采集相应深度的

1.5 kg 土壤样品,用以测定土壤物理性质。

1.4 土壤样品分析

(1)土壤切片制作。将制取后的 6 根原状土柱(每种耕作方式下各 3 根)放置在室内干燥通风处,待土柱充分风干后,使用由 E44 环氧树脂和三乙醇胺配置好的浸渍剂(体积比为 25:4),加入适量的荧光有机染料,充分搅拌使其混合均匀,在加热条件下由上至下向圆管边缘注入,待浸渍剂超出土样表面 0.5 cm 并基本稳定后,停止加入浸渍剂。然后加热到 75℃直至样品完全固化。最后用电动锯片沿原状土柱垂直高度,由上至下每隔约 2.5 cm 切割 20 次,每个土柱共获取 21 个土壤切片^[14]。

(2)土壤切片图像采集。在暗室环境条件下,使用波长为 365 nm 的 UVA 低频长波紫外线灯,配合使用 1 510 万像素的单反相机对土壤切片进行拍摄,获取不同深度下的蔗田土壤切片图像。

(3)土壤切片图像处理。将获得的土壤切片荧光图像导入 ERDAS IMAGINE 2014 软件中进行尺寸校正,然后使用 Photoshop CS 6.0 软件将切片图像以圆心为中心裁剪为 9.5 cm×9.5 cm 的圆形图像,再将所得裁剪图像进行颜色替换、灰度调节、降噪处理后,获得 2 400 pixels×2 400 pixels 的图像,并通过 ImageJ 软件将图像分割转化为二值图,其中黑色代表土壤孔隙。

1.5 土柱入渗试验

利用剩余 6 根原状土柱进行土柱入渗试验,使用马氏瓶在原状土柱上端施加 5 cm 水头高度的稳定水流进行土柱入渗试验,在土柱下端用滤布封住管口,并在滤布上垫少量石英砂作为反滤层,并对原状土柱以 10 cm 深度为一层打孔插入探针,试验开始后记录下端出流时间,并以 5 min 为单位时间记录下端出流液的流体质量作为土柱水流入渗的质量流率^[18]。以获取不同深度下的土壤体积分含水量的数据信息。当下端出流液保持稳定出流,获取水流饱和状态下的土壤体积分含水量的数据信息(用于计算不同土壤深度的饱和导水率),经过一定的时间,停止土柱入渗试验,该试验总计进行 6 次。

秩相关系数法是指衡量时间序列变化趋势在统计上有无显著性的方法,其原理采用 Daniel 趋势检验,以 Spearman 秩相关系数衡量两因子的变化趋势。本文通过秩相关系数法分析土柱入渗试验中质量流率在 0~400 min 时间段的变化趋势。

灰色关联度分析法是一种多因素统计分析方法,衡量因素之间发展的相似或相异程度。本文通过灰色关联度分析法分析蔗田土壤结构特性与水分运动的作用关系。

1.6 土壤物理性质的测定

土壤颗粒组成采用马尔文激光粒度仪(Master-sizer 3000)测定;土壤容重采用烘干法测定;土壤饱和导水率采用马氏瓶恒定水头法测定。

1.7 土壤孔隙结构特征参数

(1)土壤孔隙度。土壤孔隙度是指在某一土层内土壤切面孔隙面积占该土壤切面总面积的百分比,其值能够在一定程度上反映出土壤的结构特征,计算公式为:

$$P_i = S_{pi} / S_i \quad (1)$$

式中: i 为孔径范围,本文将蔗田土壤孔径划分为 4 个级别,依次为 $i < 0.5$ mm, $0.5 < i < 1$ mm, $1 < i < 2.5$ mm, $i > 2.5$ mm。 P_i 为在土层深度为 i 处的土壤切面孔隙度; S_{pi} 为在土层深度为 i 处的土壤切面孔隙的像元总数; S_i 为在土层深度为 i 处的土壤切面所有的像元总数。

(2)土壤孔隙变异度。土壤孔隙变异度是指在某一土层下的上、下切口断面的孔隙度之间的相对变化程度,其值越大,说明各土层的土壤孔隙之间的变化差异程度越大,计算公式为:

$$E = \frac{2|P_{bi} - P_{ui}|}{(P_{bi} + P_{ui})} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E 为在土层深度为 i 处的切口上、下相对切面的土壤孔隙变异度; P_{bi} 为在土层深度为 i 处的切口上切面的土壤孔隙度; P_{ui} 为在土层深度为 i 处的切口下切面的土壤孔隙度。

(3)土壤孔隙邻近指数。土壤孔隙邻近指数是指土壤孔隙之间的邻近程度,随着土壤孔隙的邻近性或连通性的增加,其值越接近 1,反映出土壤空间的孔隙形态整体性更好,计算公式为:

$$\text{CONTIG} = \frac{\left[\frac{\sum c_{xy}}{a_{xy}} \right] - 1}{v - 1} \quad (3)$$

式中:CONTIG 为土壤孔隙邻近指数; x 为图像中的行数; y 为图像中的列数; c_{xy} 为土壤孔隙中像素 r 的相邻值; a_{xy} 为土壤孔隙的面积(mm^2); v 为单元格模板值的总和。

(4)土壤孔隙成圆率

土壤孔隙成圆率是指土壤孔隙形态与标准圆形的接近程度,表示的是不规则孔隙的形态特征,其值越接近 1,孔隙结构越接近标准圆形,值越接近 0,说明孔隙形状越不规则,计算公式为:

$$C_i = \frac{4\pi A_i}{R_i^2} \quad (4)$$

式中: C_i 为深度为 i 处的成圆率; A_i 为深度为 i 处的土壤切面的孔隙面积(mm^2); R_i 为深度为 i 处的土壤

切面的孔隙周长(mm)。

1.8 数据处理

本研究使用 Excel 2016 软件对图像数据进行统计整理分析;使用 SPSS 26.0 软件对土壤孔隙结构和土壤水分运动特性各项参数及指标进行独立样本 T 检验差异性分析、单因素方差分析以及相关分析,差异性显著评价水平为 $p<0.05$;使用 Origin Pro 2021 对数据结果作图。

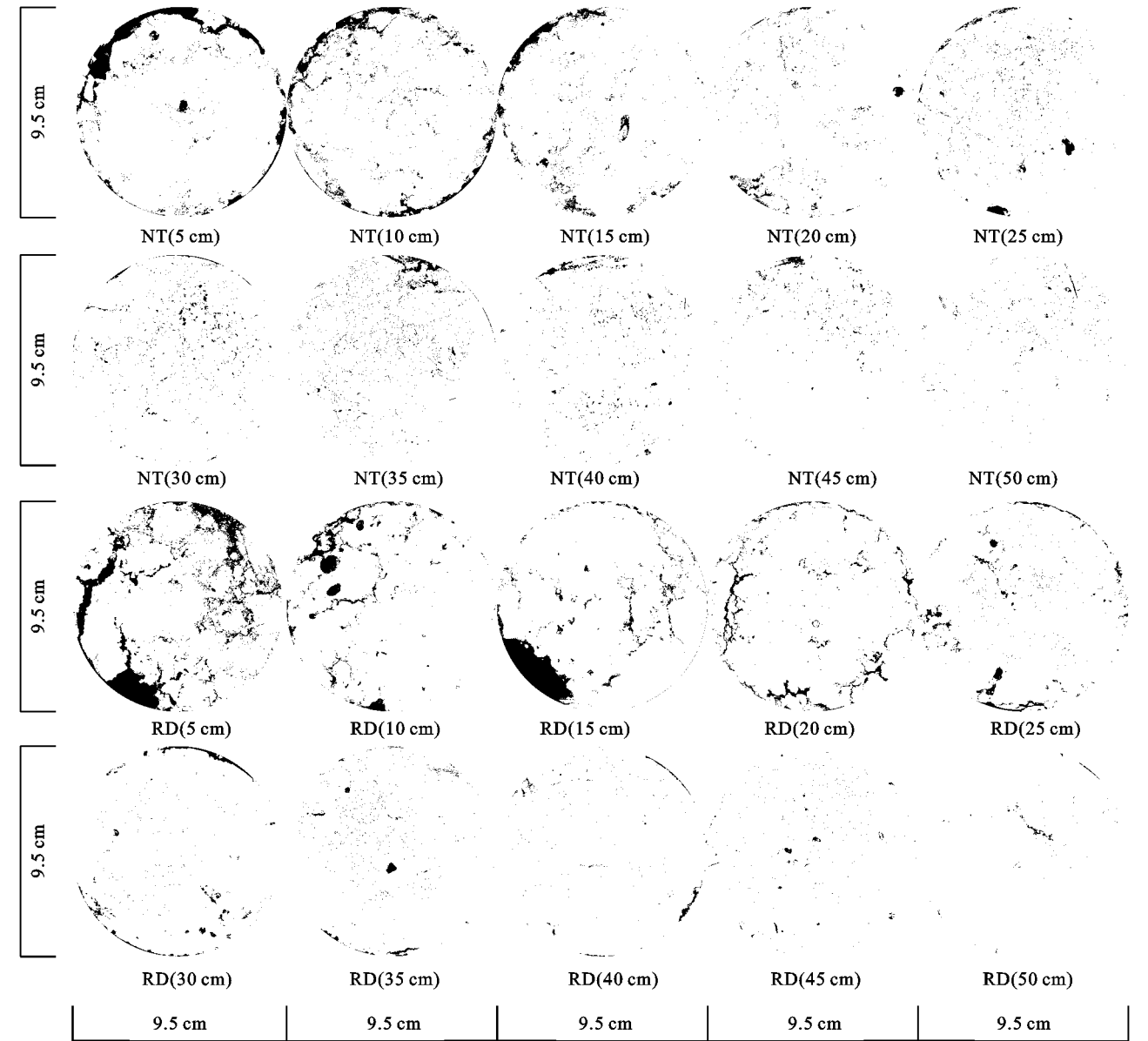
2 结果与分析

2.1 2 种耕作方式蔗田土壤孔隙几何形态

通过对同种耕作方式蔗田的土壤切片图像沿土层深度的变化情况进行分析发现其具有相似性。因此,每种耕作方式仅选取 1 根具有代表性的土柱图像

进行土壤孔隙形态定性分析说明,但定量分析采用全部图像数据。

由图 1 可知,免耕蔗田土壤孔隙面积随土层深度的增加逐渐减小,在 0—15 cm 土层,孔隙形态以集中分布的团块状为主,在 15—50 cm 土层内孔隙形态逐渐转变为零散分布的团块状。垄耕蔗田土壤孔隙面积在 0—50 cm 土层深度范围内呈现出先减少(0—35 cm),后增大(3—40 cm),再减少(40—50 cm)的变化趋势。在 0—5 cm 土层,孔隙形态以更为集中的团块状和条状为主,在 5—15 cm 土层以团块状为主伴有少量枝状孔隙,在 15—25 cm 土层,枝状形态孔隙分布显著增多,并伴有零星的团块状孔隙,在 25—50 cm 土层,团块状孔隙逐渐较少。



注:NT、RD 分别为免耕蔗田和垄耕蔗田。下同。

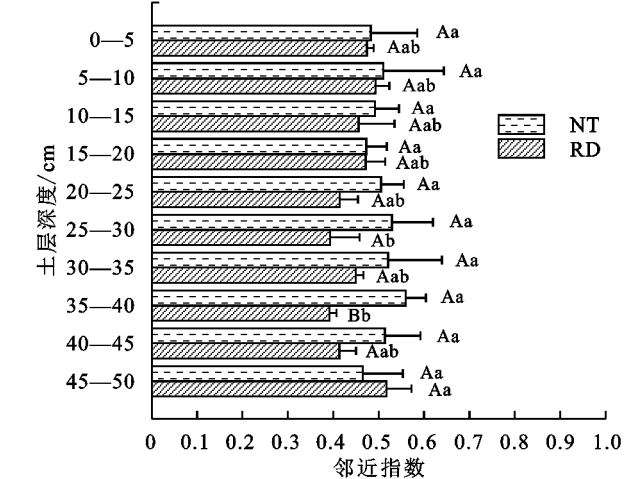
图 1 2 种耕作方式蔗田在不同土层深度下的土壤切片图像

垄耕蔗田在 0—25 cm 土层孔隙面积较大,说明在相同外部供水状况下,垄耕蔗田水分入渗量大于免

耕蔗田,且水分运动呈整体向下入渗形式。在 25—50 cm 土层,随着土层深度的逐渐增加,垄耕蔗田在

团块状、条状和枝状孔隙形态面积均出现显著减少的现象,而免耕蔗田的孔隙形态分布面积逐渐减少,表明免耕蔗田的土壤孔隙结构具有独立且整体连通性较好的特点。垄耕蔗田的孔隙分布在 0—25 cm 土层更加聚集,而在 25—50 cm 土层更加分散,相对于免耕蔗田其土壤孔隙结构复杂且整体连通性较差。在相同的外部供水条件下,免耕和垄耕蔗田土壤水分均随土层深度的增加逐渐减少,但垄耕蔗田的水分运动主要集中在 0—25 cm 土层。

2 种耕作方式下蔗田的土壤孔隙邻近指数在 0—50 cm 土层深度范围内的变化情况见图 2。通过对同一耕作方式不同土层之间的土壤孔隙邻近指数进行分析,免耕蔗田各土层间的土壤孔隙邻近指数未有显著差异($p \geq 0.05$),而垄耕蔗田在 25—30, 35—40, 45—50 cm 土层的孔隙邻近指数之间存在显著差异($p < 0.05$)。在整个 35—40 cm 土层免耕蔗田和垄耕蔗田之间孔隙邻近指数差异显著($p < 0.05$)。免耕蔗田的土壤孔隙邻近指数平均值为 0.505,显著高于($p < 0.05$)垄耕蔗田,是其 1.1 倍。进一步反映出免耕蔗田土壤水分运动连通性优于垄耕蔗田,整体水流运动性更好。



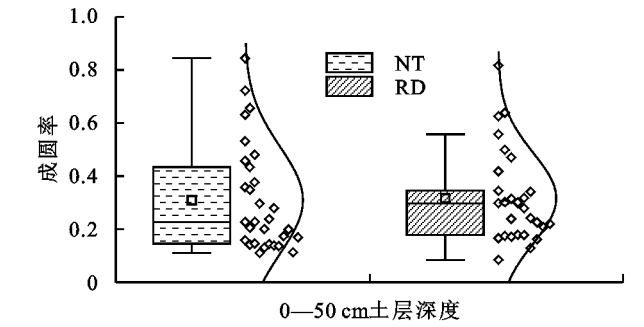
注:图中数值为平均值±标准差, $n=3$;不同大写字母表示在不同耕作方式下同一土层深度范围内数据间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示在同一耕作方式下不同土层深度范围内数据间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 2 种耕作方式蔗田土壤孔隙邻近指数随土层深度变化
通过对 2 种耕作方式蔗田的土壤孔隙成圆率进行分析(图 3)。免耕蔗田的土壤孔隙成圆率在 0—50 cm 土层深度范围内未有显著差异($p \geq 0.05$),而垄耕蔗田在 25—30, 40—45, 45—50 cm 土层孔隙成圆率存在显著差异($p < 0.05$)。垄耕蔗田的成圆率平均值为 0.335,是免耕蔗田的 1.1 倍,说明垄耕蔗田的孔隙形态相对于免耕蔗田更加规则。

2.2 2 种耕作方式蔗田土壤孔隙数量

由表 1 可知,2 种不同耕作方式蔗田的土壤孔隙

度均在 0.5%~13.0%,且免耕和垄耕蔗田孔隙度变化趋势总体保持一致,即在表层土壤 0—15 cm 范围内孔隙分布最多,分别占整个土层深度总孔隙度的 53.6%和 60.6%。对于 2 种耕作方式下的蔗田,在 5—50 cm 土层内孔隙度并无显著差异($p \geq 0.05$),但在表层土壤 0—5, 5—10 cm 的土层,垄耕蔗田孔隙度显著大于免耕蔗田($p < 0.05$),土壤孔隙度分别为 10.6%和 7.7%,是 1.4~1.7 倍。即垄耕蔗田在表层土壤 0—10 cm 范围内的孔隙数量多于免耕蔗田。



注:箱体内部横线为中位数,内部小矩形块为平均值,箱体的高度为四分位数的间距,上下两端分别为上四分位数和下四分位数,箱体上下两端的须为最大值和最小值;图例右侧为正态分布曲线; $n=3$ 。

图 3 2 种耕作方式蔗田土壤孔隙成圆率

各径级土壤孔隙度占比结果显示,2 耕作方式蔗田的各径级土壤孔隙变化保持相同的规律,均表现为 >2.5 mm 径级的孔隙数量占比最大,其次为 1~2.5 mm 径级的孔隙,随后是 <0.5 mm 的径级孔隙,0.5~1 mm 径级的孔隙数量占比最小。就各径级土壤孔隙度在整个土层深度范围内的变化趋势而言, >2.5 mm 径级孔隙度随土层深度增加而减少,而 1~2.5, 0.5~1 mm 和 <0.5 mm 径级孔隙度呈现增加的趋势。随着土层深度的增加,各径级孔隙度占比在局部上有显著差异($p < 0.05$)。

由图 4 可知,在整个土层深度 0—50 cm 范围内免耕蔗田和垄耕蔗田之间孔隙变异度在 10—15 cm 土层达到显著性水平($p < 0.05$)。免耕蔗田和垄耕蔗田的土壤孔隙变异度平均值分别为 16.5%和 16.6%,能够说明垄耕蔗田整体孔隙变异度比免耕蔗田变化幅度大,反映出垄耕蔗田的土壤孔隙沿土层深度的增加其变化更加活跃。

2.3 2 种耕作方式蔗田土壤水分运动特性

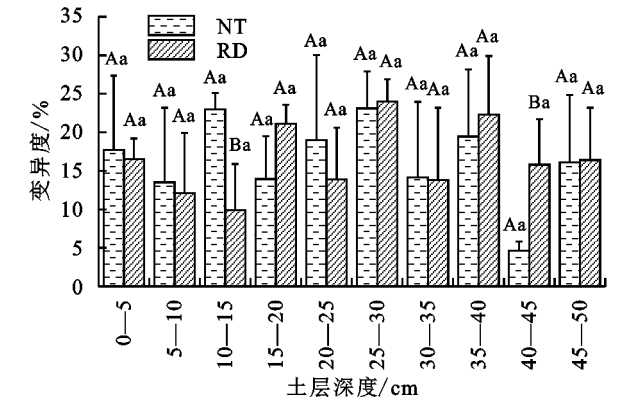
2 种耕作方式蔗田的土壤初始含水率随着土层深度的增加,总体呈增大的变化规律,垄耕蔗田在土层深度 0—20 cm 范围内的初始含水率显著高于免耕蔗田,是其 1.7 倍($p < 0.05$),在其他土层之间均无显著差异($p \geq 0.05$)(图 5)。免耕蔗田和垄耕蔗田不同土层深度间的土壤初始含水率总体差异显著($p < 0.05$)。在 0—50 cm 土层深度范围内,免耕蔗田和垄

耕蔗田的平均初始含水率分别为 16.3%和 24.7%，说明垄耕蔗田整体初始含水率大于免耕蔗田。

表 1 2 种耕作方式蔗田土壤孔隙度

耕作方式	土层深度/cm	土壤孔隙度/%	不同土壤孔径下孔隙占比/%			
			>2.5 mm	1~2.5 mm	0.5~1 mm	<0.5 mm
NT	0—5	6.12±1.07Aa	0.62±0.19Aa	0.21±0.10Aa	0.09±0.06Ac	0.08±0.03Ab
	5—10	5.57±1.06Aa	0.58±0.18Aab	0.21±0.09Aa	0.11±0.07Ac	0.10±0.03Ab
	10—15	3.78±1.00Ab	0.52±0.09Aab	0.28±0.07Aa	0.10±0.02Ac	0.10±0.01Ab
	15—20	2.97±0.80Abc	0.32±0.22Aabc	0.31±0.09Aa	0.16±0.04Aabc	0.21±0.11Aab
	20—25	2.50±0.51Abcd	0.49±0.06Aab	0.24±0.09Aa	0.12±0.02Ac	0.15±0.07Aab
	25—30	2.17±0.42Abcd	0.38±0.08Aabc	0.28±0.02Aa	0.17±0.03Aabc	0.17±0.07Aab
	30—35	1.52±0.51Acd	0.43±0.29Aab	0.31±0.18Aa	0.14±0.07Abc	0.12±0.06Ab
	35—40	1.74±0.53Acd	0.24±0.10Abc	0.28±0.02Aa	0.26±0.04Aa	0.23±0.08Aab
	40—45	1.59±0.21Acd	0.27±0.07Aabc	0.30±0.09Aa	0.22±0.01Aab	0.21±0.07Aab
	45—50	0.92±0.46Ad	0.07±0.05Ac	0.36±0.13Aa	0.24±0.02Aab	0.33±0.16Aa
RD	0—5	10.60±1.68Ba	0.73±0.04Aa	0.15±0.01Ab	0.06±0.02Ab	0.06±0.01Aa
	5—10	7.72±2.44Bab	0.65±0.09Aab	0.21±0.05Aab	0.08±0.03Ab	0.06±0.02Aa
	10—15	4.86±1.51Abc	0.58±0.12Aabc	0.22±0.08Aab	0.11±0.03Ab	0.10±0.03Aa
	15—20	3.29±1.65Acd	0.49±0.10Aabcd	0.28±0.05Aab	0.11±0.02Ab	0.12±0.04Aa
	20—25	3.24±0.58Acd	0.55±0.11Aabc	0.21±0.01Aab	0.11±0.03Ab	0.13±0.08Aa
	25—30	1.91±0.81Acd	0.63±0.15Aabc	0.20±0.10Aab	0.09±0.04Ab	0.08±0.02Aa
	30—35	1.88±1.02Acd	0.33±0.15Acde	0.25±0.10Aab	0.12±0.02Aab	0.30±0.17Aa
	35—40	2.24±1.69Acd	0.42±0.18Abcde	0.23±0.04Aab	0.12±0.07Aab	0.22±0.16Aa
	40—45	1.31±1.04Ad	0.21±0.15Ade	0.34±0.06Aa	0.15±0.04Aab	0.30±0.14Aa
	45—50	1.22±0.67Ad	0.19±0.14Ae	0.33±0.12Aa	0.20±0.04Aa	0.29±0.21Aa

注：表中数值为平均值±标准差， $n=3$ ；不同大写字母代表在不同耕作方式下同一土层深度范围内数据间差异显著($p<0.05$)；不同小写字母代表在同一耕作方式下不同土层深度范围内数据间差异显著($p<0.05$)。下同。



注： $n=3$ 。
图 4 2 种耕作方式蔗田土壤孔隙变异度随土层深度变化

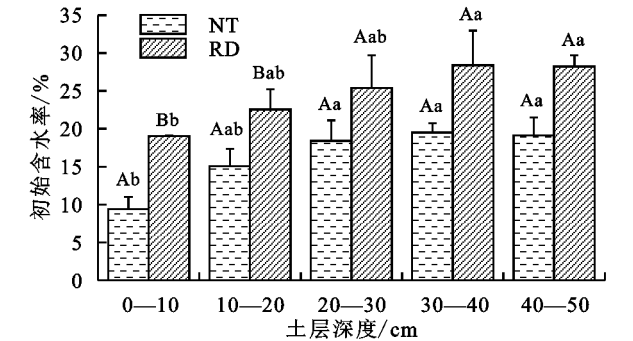


图 5 2 种耕作方式蔗田土壤初始含水率
2 种耕作方式蔗田的土壤饱和导水率随土层深度的增加逐渐减少(图 6)。垄耕与免耕蔗田在 0—10

cm 和 40—50 cm 土层的饱和导水率差异显著($p<0.05$)。在 0—50 cm 土层深度范围内,免耕蔗田和垄耕蔗田的平均饱和导水率分别为 2.153,1.599 mm/min,表明免耕蔗田整体饱和导水率大于垄耕蔗田,在 0—50 cm 土层的土壤水分运动状况较好。反映出免耕蔗田整体的饱和导水率高于垄耕蔗田,这一结果与上文针对土壤孔隙分布结构描述相一致,进一步反映出免耕蔗田的孔隙结构相对更加连通。

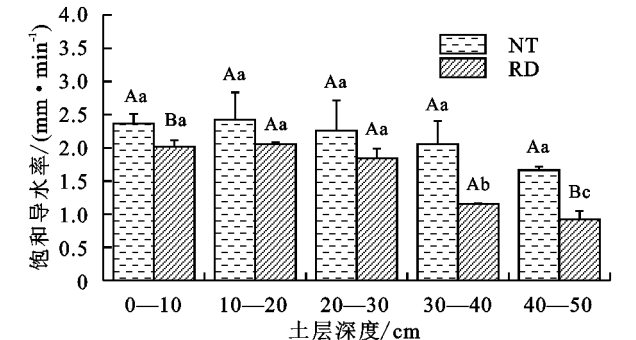


图 6 2 种耕作方式蔗田土壤饱和导水率
2 种不同耕作方式蔗田土壤在不同时刻下的平均质量流率变化情况见图 7。免耕蔗田的质量流率在初始阶段 0~10 min 范围内迅速上升,在 15~20 min 范围内出现波峰,其值为 0.396 g/s,随后在 20~30 min 内短暂出现波谷(0.371 g/s)并在 30~50 min

时间段波动上升至最大质量流率 0.397 g/s,在 50~115 min 时间段内,质量流率迅速下降至 0.323 g/s,随着水流入渗的时间增加,免耕蔗田的质量流率呈现波动降低的趋势,随后在 0.320 g/s 达到稳定。垄耕蔗田的质量流率在 0~5 min 内持续上升直至最大质量流率 0.341 g/s,在 5~75 min 时间段内较快下降至 0.299 g/s,随后在 75~255 min 时间段内缓慢下降至 0.289 g/s,最后趋于相对稳定的状态。

通过对 0~400 min 时间段内 2 种不同耕作方式蔗田的质量流率变化曲线进行分析,免耕方式下的平均质量流率(0.331 g/s)是垄耕方式下的平均质量流率(0.296 g/s)的 1.1 倍。免耕蔗田和垄耕蔗田不同时刻下的质量流率差异显著($p<0.05$),表明免耕蔗田原状土柱的平均质量流率较大且变化幅度较大,说明水流入渗速度相对较大且水流入渗相对活跃,而垄耕蔗田随着时间的增加,平均质量流率相对较小且变化较为平缓,水流入渗相对稳定。

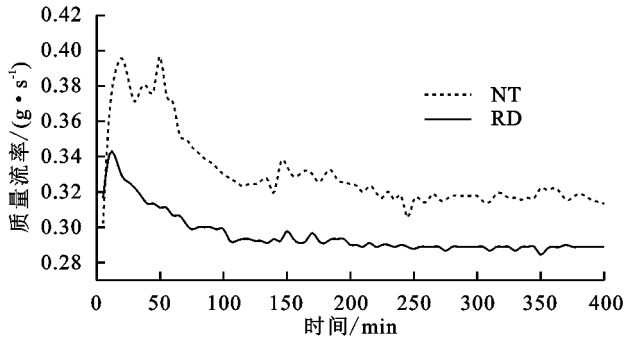


图 7 2 种耕作方式蔗田平均质量流率变化曲线

Spearman 秩相关系数是用来度量 2 个变量之间联系强弱的统计参数,当某一变量的秩相关系数绝对值越大,其变化强度越高。通过计算得到免耕和垄耕蔗田的 spearman 秩相关系数为-0.826 和-0.775,2 种不同耕作方式的质量流率变化趋势显著性结果(表 2)表明,免耕和垄耕蔗田得分值表示均在 0~400 min 内呈减少趋势,在置信水平 99%时具有显著意义。免耕蔗田的秩相关系数绝对值(0.826)大于垄耕蔗田的秩相关系数绝对值(0.775),表明免耕蔗田质量流率随时间变化强度相对较大,水流入渗效果相对明显。

表 2 2 种耕作方式质量流率变化趋势显著性检验

耕作方式	n	r_s 值	W_p		趋势	显著性
			0.05	0.01		
NT	80	-0.826	0.217	0.283	下降	有显著意义(0.01)
RD	80	-0.775	0.217	0.283	下降	有显著意义(0.01)

2.4 2 种耕作方式蔗田土壤结构特性与水分运动的作用关系

灰色关联度反映因素之间发展趋势的相似或相异程度,当 2 个因素变化的趋势具有一致性,其值越趋近于 1,即二者关联程度较高。利用灰色关联分析

法,将可以表征土壤水分运动特性的饱和导水率、初始含水率、土柱入渗初始出流时间、稳定质量流率和平均质量流率作为比较序列。而将土壤水分运动特性达到最优时,即 100% 设为参考序列,对蔗田内土壤水分特征进行灰色关联度分析,饱和导水率、初始含水率、初始出流时间、稳定质量流率和平均质量流率的灰关联度值依次为 0.690,0.652,0.524,0.721 和 0.701。对土壤水分运动特征性影响最大的是稳定质量流率,说明其接近最优即可以较好的表征土壤水分运动特性。

因此,进一步以稳定质量流率作为参考序列,以土壤孔隙度、孔隙变异度、孔隙邻近指数和孔隙成圆率等土壤孔隙结构特征作为比较序列,进行土壤孔隙结构特征与土壤水分运动状况之间作用关系分析(图 8)。稳定质量流率与土壤孔隙度、孔隙变异度、孔隙邻近指数和孔隙成圆率的灰关联度分别为 0.458,0.779,0.595 和 0.528。对于蔗田土壤而言,土壤孔隙变异度对于稳定质量流率的灰关联度值最高,说明土壤孔隙空间的变化程度对于土壤水分运动特性具有较大的影响作用。

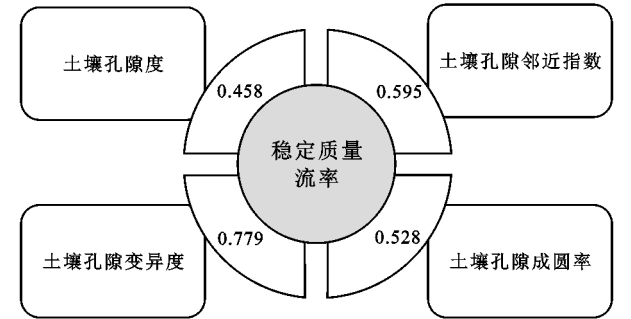


图 8 蔗田土壤稳定质量流率与孔隙结构关联性

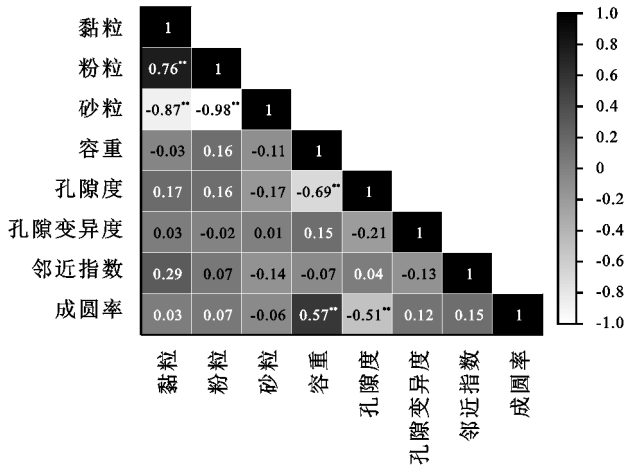
3 讨论

3.1 耕作方式对土壤孔隙结构的影响

本研究中 2 种耕作方式下蔗田土壤孔隙的形态和数量特征之间存在差异。与免耕相比,由于垄耕扰动破坏了原有的土壤结构,形成大量破碎化的孔隙,增加了田间土壤的通透性^[9]。由于免耕蔗田人为扰动影响较小,保持有上下高度连通的土壤孔隙结构^[19],形成的孔隙形态呈团块状分布为主。垄耕蔗田改变了相对独立的孔隙结构,孔隙形态更加均质规则化(平均成圆率为 0.335)^[20]。免耕蔗田土壤孔隙邻近指数平均值是垄耕蔗田的 1.1 倍,进一步反映出免耕蔗田土壤孔隙连通性优于垄耕蔗田,整体土壤孔隙结构相对更好^[19]。本研究得出,土壤孔隙变异度对于土壤水分运动特性具有较大的影响作用,垄耕蔗田土体结构相对免耕蔗田更加复杂,导致垄耕蔗田孔隙变异度相对于免耕蔗田更大。有研究^[21]发现,土壤孔隙的空间变异性越大,会降低土壤孔隙的连通性,不利于

水分的空间性运移,阻碍水分的运动,Garbout 等^[22]发现,耕作措施下的土壤孔隙各异性较低,平均分支长度较短,会降低土壤水分的输送效果。

通过对土壤容重、黏粒、粉粒和砂粒等物理性质与土壤孔隙度、孔隙变异度、邻近指数和成圆率等土壤结构的指标进行相关性分析(图 9)得出,土壤容重与土壤孔隙度呈显著负相关关系($p<0.01$),与成圆率呈显著正相关关系($p<0.01$),说明土壤容重对孔隙的数量和形态具有较大的影响。杨昊晟等^[23]研究认为,土壤容重与土壤各级孔隙度和孔隙面积都有显著的相关关系,土壤容重可以作为分析土壤结构状况的指标。



注: * 表示极显著相关($p<0.01$); * 表示显著相关($p<0.05$)。

图 9 土壤物理性质与土壤结构的相关性分析

土壤孔隙度是反映土壤结构性的重要指标,影响土壤的水分入渗和气体扩散^[16]。定量分析结果表明,免耕和垄耕蔗田土壤孔隙度均随着土层深度的增加而减少。张丽娜等^[24]通过不同耕作方式对旱地红壤结构的影响研究得出,深耕和深松对土壤均产生较大的扰动,使土壤孔隙度均大于免耕。在 0—5, 5—10 cm 土层垄耕田间土壤孔隙度均显著大于免耕,分别提高至 73.2% 和 38.6%。而 10—50 cm 土层的 2 种耕作方式蔗田均无显著差异^[25]。相较于免耕,垄耕对土壤翻作产生较大的扰动,改变土壤的结构,提高 >2.5 mm 孔径的孔隙度以及土壤总孔隙度。Dal Ferro 等^[26]也发现,传统耕作相较于免耕提高 0.1~2.5 mm 孔径的孔隙度以及总孔隙度的研究结果。但有相关研究^[27]发现,耕作处理下破坏土体结构,使得农地土壤大孔隙显著低于免耕处理,这可能与研究区域的土壤类型和种植作物类型有关。

3.2 耕作方式对土壤水分运动的影响

耕作方式能够改变土壤结构和土壤孔隙,影响土壤的通透性,进而影响土壤饱和导水率^[8]。垄耕可以有效提高表层 0—10 cm 土壤的饱和导水率,且随土层深度的增加饱和导水率显著高于免耕,耕作后的土壤孔隙

直径大,有利于土壤的导水透气^[27]。在 0—10 cm 土层,与垄耕土壤相比,免耕后的土壤大孔隙和毛管孔隙数量显著减少,饱和导水率显著降低^[28]。在土壤 0—20 cm 土层,垄耕蔗田的初始含水率显著大于免耕,且在整个土层深度范围内土壤初始含水率均表现为垄耕蔗田大于免耕蔗田。本研究发现,在 10—50 cm 土层,免耕蔗田有利于土壤饱和导水率的提高,土壤数量多且连通性较好,水流可以快速的在土壤中入渗,降低土壤层中的含水量^[15]。在相关的研究^[29]中发现,耕作措施下频繁破碎土壤,导致土壤中的连通孔隙和大孔隙数量增加,而大孔隙在接近饱和的流动过程中增加土壤水分的渗透和排水。但是,也有研究^[30]结果显示在耕作措施下,时常扰动土壤,极易使大孔隙分解为中或小孔隙,与不耕作措施相比,这在一定程度上减少大孔隙的丰富程度。而本研究中垄耕措施下大孔隙数量相对更多,但水分运动性能却相对较弱,其原因是垄耕地土壤孔隙连通性相对较低,导致通水通气性能下降,制约着土壤水分入渗能力,水分运动受到了限制。

免耕蔗田和垄耕蔗田在不同时刻下的质量流率差异显著($p<0.05$),免耕蔗田水流入渗速度相对较大且水流入渗相对活跃,土壤水分入渗能力优于垄耕蔗田。由于免耕蔗田受扰动影响较小,土壤非毛管孔隙要高于传统耕作方式,同时可以提高土壤的通气透水能力^[31]。免耕处理下良好的孔隙结构,使有效孔隙连通不间断,有利于水分的快速移动^[32]。有研究^[33]发现,这可能是深松耕作打破土壤犁底层,加深耕层的大孔隙通道,使得深松更利于水分入渗。

本研究利用土壤切片方法与土柱入渗试验,结合图像形态分析方法相结合来定量分析田间土壤孔隙结构特征。应用土壤切片不仅能够可视化土壤的孔隙形态特征,也能够量化其数量与空间分布特征。但该方法受研究尺度的影响,相比于 CT 扫描等方法对于微观土壤孔隙结构尺度的分析较为薄弱,在后续的研究使用过程中可结合相关微尺度的观测分析方法协同开展土壤孔隙结构特征研究。

4 结论

(1)与免耕相比,垄耕可以较大改变土壤孔隙结构,提高 >2.5 mm 孔径的孔隙度以及土壤总孔隙度,孔隙形态更加规则,土壤孔隙变异程度相对更高。

(2)免耕蔗田的土壤孔隙的整体性和连通性均较高,形成相对良好的土壤孔隙结构,进而提高土壤饱和导水率、平均质量流率及质量流率变化强度,水流入渗相对垄耕蔗田更快。

(3) 垄耕措施可以有效调节蔗田土壤水分状况,提高田间 0—20 cm 土壤层的蓄水能力,在一定程度上相比免耕措施可改善甘蔗作物生长区对土壤水分利用情况。

参考文献:

- [1] 邓宇驰,罗霆,周慧文,等.2021 年广西蔗区糖料蔗生产调查[J].中国种业,2022,28(3):55-59.
- [2] 秦川,何洁琳,李艳兰,等.2021 年广西气候概况[J].气象研究与应用,2022,43(1):84-89.
- [3] 孟博,周一帆,战健,等.广西蔗区土壤肥力和叶片养分状况调查研究[J].中国土壤与肥料,2022(2):181-188.
- [4] 郭长强,崔远来,李新建,等.广西糖料甘蔗需水量和灌溉定额空间变异[J].农业工程学报,2016,32(8):89-97.
- [5] 陈伟,杨洁,孙从建,等.黄土丘陵区不同耕作方式对土壤持水能力的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(8):147-153.
- [6] 杭玉浩,王强盛,许国春,等.稻田土壤养分特性对不同耕作方式的生态响应[J].中国农学通报,2017,33(10):106-112.
- [7] 郑洪兵,罗洋,李瑞平,等.耕作方式对根土关系的影响及 CT 技术在其研究上的应用[J].中国农学通报,2021,37(33):83-87.
- [8] 杨永辉,武继承,张洁梅,等.耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(2):258-266.
- [9] 蔡立群,罗珠珠,张仁陟,等.不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J].中国沙漠,2012,32(5):1362-1368.
- [10] 姜波,陈晓冰,吴晗,等.基于色相分割的甘蔗地土壤优先流程度定量评价[J].水土保持学报,2022,36(1):50-57,65.
- [11] 王瑾瑜,程文龙,槐圣昌,等.深翻、有机无机肥配施对稻田水分渗漏和氮素淋溶的影响[J].中国农业科学,2021,54(20):4385-4395.
- [12] 李庆,王玉凤,张翼飞,等.耕作方式对三江平原玉米土壤结构及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2021(6):95-103.
- [13] 张保华,陶宝先,曹建荣,等.黄河下游不同质地潮土孔隙形态特征[J].中国土壤与肥料,2019(3):8-14.
- [14] 华珊,陈研,梁露焘,等.利用基于偏微分方程的图像滤波技术研究土壤孔隙结构[J].农业工程学报,2014,30(3):78-85.
- [15] 张东旭,张洪江,程金花.基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J].农业机械学报,2017,48(12):214-220,277.
- [16] 邱琛,韩晓增,陈旭,等.CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土孔隙结构影响[J].农业工程学报,2021,37(14):98-107.
- [17] 申志福,孙天佑,白宇帆,等.基于电镜成像原理的黏土微结构参数提取方法[J].岩土工程学报,2021,43(5):933-939.
- [18] 张晓钟,孟凡芹,宋生奎.基于神经网络的超声波轻质燃油质量流量测量方法研究[J].计量学报,2017,38(2):205-208.
- [19] 刘玲玲,李超,房焕,等.免耕对稻油轮作系统土壤结构的影响[J].土壤学报,2021,58(2):412-420.
- [20] Borges J A, Pires L F, Cássaro F A, et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes [J]. Soil and Tillage Research, 2019,189:25-35.
- [21] Menon M, Mawodza T, Rabbani A, et al. Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability[J]. Geoderma,2020,366:e114259.
- [22] Garbout A, Munkholm L, Hansen S. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation[J]. Soil and Tillage Research,2013,128:104-109.
- [23] 杨昊晟,马永胜,胡笑涛,等.种植年限对渭北旱塬苹果园土壤孔隙结构及水力特征的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(5):94-104.
- [24] 张丽娜,Evans A,张陆勇,等.耕作方式对旱地红壤物理特性的影响[J].水土保持研究,2018,25(3):46-50.
- [25] 杨永辉,武继承,毛永萍,等.免耕对土壤剖面孔隙分布特征的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(7):1019-1028.
- [26] DalFerro N, Sartori L, Simonetti G, et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth[J]. Soil and Tillage Research,2014,140:55-65.
- [27] 甘磊,李健,李帅,等.广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J].水土保持研究,2020,27(6):122-130.
- [28] 孔凡磊,陈阜,张海林,等.轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):150-155.
- [29] Guo Y, Fan R, Zhang X, et al. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J]. Science of the Total Environment, 2020,703:e134617.
- [30] Gao L, Becker E, Liang G, et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon[J]. Geoderma,2017,288:97-104.
- [31] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [32] 郭孟洁,李建业,李健宇,等.实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J].农业工程学报,2021,37(22):108-118.
- [33] Hati K, Chaudhary R, Mandal K, et al. Effects of tillage, residue and fertilizer nitrogen on crop yields, and soil physical properties under soybean-wheat rotation in vertisols of Central India [J]. Agricultural Research, 2015,4(1):48-56.