

# 广西喀斯特地区甘蔗地土壤收缩变化研究<sup>①</sup>

郑思文<sup>1,2</sup>, 李振东<sup>3</sup>, 陈晓冰<sup>2,3</sup>, 张金莲<sup>4</sup>, 马蕊<sup>3</sup>, 陈廷速<sup>4</sup>, 甘磊<sup>1,2\*</sup>

(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 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541004; 4 广西农业科学院微生物研究所, 南宁 530007)

**摘要:** 广西喀斯特地区干湿季节明显, 旱地土壤在干湿交替过程中的土壤胀缩易导致土壤裂隙产生, 从而影响土壤水分和养分的保存与运移。本研究以广西南宁里建农业科学院甘蔗地为研究对象, 在耕作与免耕条件下, 利用 Soil Shrinkage Simulator (SSS) 软件对不同土壤含水量条件下甘蔗地土壤进行土壤线性伸展系数变化和土壤收缩曲线拟合的研究。结果表明: 土壤收缩特征曲线拟合值和原状土壤样品实测值拟合度较高( $R^2 > 0.94$ ); 耕作与免耕条件下, 土壤线性伸展系数与土壤含水量呈正相关, 土壤含水量越高土壤的线性伸展系数越大, 收缩越明显; 相较于免耕条件下, 耕作能够影响土壤含水量的空间分布, 调节土壤结构, 改善土壤理化性质, 增强土壤的收缩能力。因此, 研究广西喀斯特地区不同耕作条件下土壤收缩变化可以为广西喀斯特地区合理开展甘蔗种植及土壤保水保肥提供理论依据。

**关键词:** 耕作方式; 土壤收缩; 线性伸展; 收缩曲线

**中图分类号:** S152.9 **文献标识码:** A

随着全球气候的变化和区域性干旱的加剧, 农业土壤经常处于干旱、失水状态<sup>[1]</sup>。土体湿润时土壤中的固相物质分离发生膨胀, 土体干旱时土壤中的固相物质重新组合土体收缩, 并伴随着土体表面积凹陷, 甚至在土体薄弱处出现开裂, 进而导致土体表面积增加, 加剧裂隙内表面土壤水分的蒸发, 形成潜在的干旱因子<sup>[2]</sup>。在降雨和灌溉中, 土体干旱收缩形成的裂隙还能作为优势流路径, 加速土壤水分、养分和农药等物质的入渗, 降低土壤水分、养分的利用率, 增加了地下水污染的可能<sup>[3-4]</sup>。因此, 研究土壤收缩对保护水土资源、减轻地下水污染以及农业安全生产具有重要指导意义。

土壤质地、土壤含水量、土壤结构以及土壤利用类型等多种土壤性质在外界环境综合作用下可以对土壤收缩变化产生影响<sup>[5-6]</sup>。魏玉杰等<sup>[7]</sup>通过采用 SS-1 型土壤收缩仪测定崩岗体不同层次原状土壤的收缩特征曲线, 发现不同土壤质地的土壤收缩率是不相同的, 表现出土壤质地越黏, 土壤的收缩率越大。邵明安和吕殿青<sup>[8]</sup>发现室内压力膜法可以较好地测定 5 种土壤在脱水收缩条件下的比容重和土壤含水

量等, 并通过绘制了不同比容重条件下的土壤收缩特征曲线, 研究土壤比容重对土壤收缩的影响。通过对不同变形土的研究, Du 等<sup>[9]</sup>发现造成土壤胀缩的主要因子是土壤含水量。然而目前关于土壤收缩的研究多基于土壤收缩与土壤内在影响因子之间的研究, 关于广西喀斯特地区不同耕作条件下土壤收缩差异的研究则相对较少。在不同耕作条件下, 土壤的含水量、质地和营养成分等都将发生变化, 而这些变化可能导致土壤收缩差异<sup>[10-11]</sup>。因此, 研究广西地区不同耕作条件下土壤收缩变化是十分必要的。甘蔗是广西地区重要的经济作物, 也是我国糖业重要的原料<sup>[12]</sup>, 保证其安全生长对广西甚至我国糖业具有重要意义。本文通过选取广西南宁武鸣里建基地耕作与免耕条件下的甘蔗地作为研究对象。通过采用 Peng 和 Horn<sup>[13]</sup>在 van-Genuchten 方程的基础上修改而得到的收缩曲线模型对耕作与免耕作条件下的甘蔗地原状土壤进行土壤线性伸展系数变化和土壤收缩曲线拟合的研究, 分析不同耕作方式下土壤收缩变化, 为广西地区合理的甘蔗种植模式和土壤保水保肥提供理论依据。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501230, 41701248)和广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198102, 2016GXNSFAA380197)资助。

\* 通讯作者(allen\_gl2006@163.com)

作者简介: 郑思文(1991—), 男, 江西新干人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤结构研究。E-mail: zc\_5403@163.com

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况与采样

研究区位于广西南宁市武鸣区里建农业科学研究基地内(23°14' N, 108°03' E), 整个地势从西北向东南逐渐倾斜, 最高海拔为 342 m, 平均海拔为 125 m, 年均气温为 21.6 °C, 年均降雨量为 1 233.4 mm, 年均相对湿度为 78%, 属于亚热带季风气候, 土壤类型为红壤, 土壤质地以砂壤土为主。本次研究区以耕作与免耕条件下的甘蔗试验样地进行土壤收缩研究。由于甘蔗地耕作过程中需要进行粗耕、细耕和整平 3 个过程, 粗耕一般以深挖为主, 其作用深度为 40~50 cm; 细耕以翻松为主, 其作用深度为 20~30 cm; 而整平一般作用在土壤表面, 其耕作深度在 0~10 cm。因此在采样点用环刀(100 cm<sup>3</sup>)分别采集甘蔗样地上、中、下 3 层, 上层土壤样品采集深度为 0~8 cm, 中层土壤样品采集深度为 18~26 cm, 下层土壤样品采集深度为 40~46 cm, 每个深度土壤样品采集 5 个重复。为了测定甘蔗样地土壤基本理化性质, 我们在采集环刀土壤样品的同时采集部分散装土样。土壤的基本理化性质分析主要包括: 土壤容重、土壤总孔隙度、土壤质地和土壤有机质等, 其数据测定方法步骤参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[14]</sup>。

### 1.2 收缩试验

本试验主要利用深度游标卡尺测量法, 对研究样品进行收缩测定<sup>[15]</sup>。首先利用深度游标卡尺对饱水处理后的土壤样品进行高度测定(为了减小测量误差, 我们每次都测量土样表面相同的 5 个点)。然后使用相同的测量手法分别测定在自然风干条件下 24、48、72、96 和 120 h 以及最后在 105 °C 温度下烘 24 h 的土壤高度以及质量。

### 1.3 数据处理

土壤的线性伸展系数(coefficient of linear extensibility, COLE)可以用来描述土壤在湿润和干燥两点间收缩幅度情况, 计算式为<sup>[16]</sup>:

$$\text{COLE} = \frac{L_t - L_{105^\circ\text{C}}}{L_{105^\circ\text{C}}} \quad (1)$$

式中:  $L_t$  为土壤样品在  $t$  时刻下的长度(mm),  $L_{105^\circ\text{C}}$  为土壤样品经过 105 °C 烘干后的长度(mm)。由于土壤线性伸展系数仅能描述土壤中两点之间的收缩幅度, 不能描述不同含水量条件下土壤样品的连续收缩情况。为了更加全面地分析土壤样品收缩情况, 本文引入土壤收缩曲线。土壤收缩曲线的定义是指土壤孔隙体积随土壤水分比变化情况。本文中土壤收缩曲线模型采用的是 Peng 和 Horn<sup>[13]</sup>在 van-Genuchten 方程

的基础上修改得到的模型, 其表达式为:

$$e(\theta) = e_r + \frac{e_s - e_r}{[1 + (\chi\theta)^{-p}]^q}, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_s \quad (2)$$

式中:  $e(\theta)$ 、 $\theta$ 、 $\theta_s$ 、 $e_r$ 、 $e_s$  分别为土壤孔隙比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、土壤水分比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、饱和水分比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、土壤残余孔隙比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、土壤饱和点孔隙比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),  $\chi$ 、 $p$ 、 $q$  是无量纲的拟合参数。

另外, 土壤的特征收缩曲线可以分为 4 个阶段: 结构收缩段、线性收缩段、残余收缩段以及零收缩段。收缩段的孔隙收缩比例公式为<sup>[17]</sup>:

$$e_{ss} = \frac{e_s - e_w}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (3)$$

$$e_{ps} = \frac{e_w - e_p}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (4)$$

$$e_{rs} = \frac{e_p - e_z}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (5)$$

$$e_{zs} = \frac{e_z - e_r}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $e_w$ 、 $e_p$ 、 $e_z$  分别代表土壤结构收缩段终点孔隙比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、土壤线性收缩段终点孔隙比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、土壤残余收缩段终点孔隙比(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),  $e_{ss}$ 、 $e_{ps}$ 、 $e_{rs}$ 、 $e_{zs}$  分别代表土壤结构收缩段孔隙收缩比例(%), 土壤线性收缩段孔隙收缩比例(%), 土壤残余收缩段孔隙收缩比例(%), 土壤零收缩段孔隙收缩比例(%).

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本属性

表 1 中列出了甘蔗地在耕作与免耕条件下的土壤质地、土壤容重、土壤有机质和土壤孔隙度等土壤基本性质。耕作和免耕两个试验区的土壤颗粒含量比例差异不大, 都表现出土壤砂粒含量>粘粒含量>黏粒含量的趋势, 而且随着土层深度的增加土壤砂粒含量逐渐减小, 黏粒含量逐渐增大。耕作条件下的 0~8 cm 土层土壤容重最小, 且土壤容重随着土层深度的增加而逐渐变大, 表层 0~8 cm 土壤容重和 40~46 cm 土壤容重差异显著( $P < 0.05$ )。免耕条件下的表层 0~8 cm 和 18~26 cm 土层土壤容重大于耕作条件下, 但是免耕条件下的 3 层土壤容重差异不显著。在土壤有机质方面, 耕作条件下的土壤有机质含量随土层深度增加而增加, 差异显著; 而免耕条件下的 0~8 cm 土层和 18~26 cm 土层土壤有机质差异不显著, 但与 40~46 cm 土层差异显著。在土壤孔隙度方面, 两者差异不显著。综上所述, 耕作方式在一定程度上能够改变

表 1 甘蔗地土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physiochemical properties of tested sugarcane soils

试验地	土层深度(cm)	砂粒(g/kg)	粉粒(g/kg)	黏粒(g/kg)	容重(g/cm <sup>3</sup> )	有机质(g/kg)	孔隙度(%)
耕作	0~8	473.6	328.4	198.0	1.58 ± 0.007 b	4.73 ± 0.092 c	35.71 ± 0.422 a
	18~26	451.6	300.0	248.4	1.61 ± 0.018 ab	6.35 ± 0.492 b	36.79 ± 0.289 a
	40~46	376.8	365.6	257.6	1.66 ± 0.019 a	8.15 ± 0.301 a	35.50 ± 0.273 a
免耕	0~8	500.8	351.6	147.6	1.59 ± 0.020 a	6.71 ± 0.287 b	37.44 ± 0.254 a
	18~26	481.2	335.2	183.6	1.64 ± 0.012 a	6.85 ± 0.808 b	37.17 ± 0.536 a
	40~46	384.8	364.4	250.8	1.62 ± 0.018 a	12.08 ± 0.831 a	37.62 ± 0.234 a

注：同列数据小写字母不同表示同一试验地不同土层深度间差异显著( $P < 0.05$ ),  $n = 5$ 。

甘蔗地土壤颗粒的级配,增加深层土壤容重,减小土壤孔隙度。

## 2.2 土壤收缩特征

**2.2.1 土壤线性伸展** 表2和表3分别给出了耕作和免耕条件下甘蔗地土壤样品在饱和、自然风干(24、48、72、96和120 h)条件下土壤体积含水量和土壤线性伸展系数。由表2可知:免耕条件下土壤含水量整体上大于耕作条件下。在自然风干过程中,耕作条件下的0~8 cm土层和40~46 cm土层土壤含水量差异不明显,而18~26 cm土层土壤含水量最大且与其他两层差异显著;免耕条件下0~8 cm土层土壤含水量

最低,18~26 cm土层和40~46 cm土层土壤含水量差异不大。由表3可知:耕作和免耕条件下的表层土壤线性伸展系数都最大,且基本呈现免耕大于耕作,而在18~26 cm和40~46 cm土层土壤线性伸展系数相差不大。在自然风干96 h后,免耕条件下土壤的线性伸展系数几乎不再发生变化,而耕作条件下表层土壤的线性伸展系数仍随自然风干时间的延长逐渐降低。结合表2和表3可知,耕作条件下土壤含水量和土壤线性伸展系数基本小于免耕条件下,说明耕作会在一定程度上改变土壤的持水能力,减小土壤线性伸展系数。

表 2 不同风干条件下甘蔗地土壤体积含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)  
Table 2 Moistures in sugarcane soils under different air-drying conditions

试验地	土层深度(cm)	饱和	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
耕作	0~8	0.358	0.280	0.248	0.215	0.186	0.156
	18~26	0.369	0.303	0.277	0.249	0.186	0.196
	40~46	0.356	0.288	0.256	0.225	0.194	0.162
免耕	0~8	0.376	0.301	0.270	0.242	0.214	0.183
	18~26	0.373	0.307	0.282	0.259	0.236	0.208
	40~46	0.378	0.312	0.283	0.257	0.230	0.199

表 3 不同风干条件下甘蔗地土壤线性伸展系数  
Table 3 Linear extension of sugarcane soils under different air-drying conditions

试验地	土层深度(cm)	饱和	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
耕作	0~8	0.031	0.026	0.020	0.016	0.013	0.014
	18~26	0.020	0.017	0.012	0.008	0.005	0.004
	40~46	0.018	0.016	0.014	0.010	0.007	0.007
免耕	0~8	0.042	0.036	0.031	0.027	0.022	0.022
	18~26	0.021	0.016	0.014	0.012	0.007	0.007
	40~46	0.018	0.016	0.014	0.012	0.010	0.010

**2.2.2 土壤收缩曲线** 表4和表5给出了耕作和免耕条件下甘蔗地原状土样收缩曲线拟合相关参数及曲线各个阶段的拐点。其中土壤收缩曲线的实测值和拟合曲线的相关系数均大于0.94,表明收缩曲线方程

能够较好地拟合甘蔗地土壤收缩曲线。由表4可知,免耕条件下甘蔗地土壤的 $e_s$ 和 $e_r$ 值大于耕作条件下,说明耕作方式对土壤的孔隙结构有一定的影响,耕作破坏了土壤自身的结构,使土壤的孔隙比有所降低。

表 4 甘蔗地土壤收缩相关参数  
Table 4 Shrinkage parameters of sugarcane soils

试验地	土层深度(cm)	$e_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$e_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\chi$	$p$	$q$	$r$
耕作	0~8	0.599	0.512	2.185	11.394	0.643	0.996
	18~26	0.606	0.526	2.030	19.415	0.405	0.998
	40~46	0.567	0.503	2.307	13.163	0.316	0.971
免耕	0~8	0.626	0.530	2.263	8.962	1.19	0.989
	18~26	0.602	0.532	3.846	7.132	31.988	0.941
	40~46	0.617	0.557	1.832	201.066	0.013	0.942

表 5 甘蔗地土壤收缩曲线对应的 5 个拐点  
Table 5 Five inflection points corresponded with shrinkage curves of sugarcane soils

试验地	土层深度(cm)	$(\vartheta_s, e_s)$	$(\vartheta_{shw}, e_{shw})$	$(\vartheta_{ac}, e_{ac})$	$(\vartheta_{shl}, e_{shl})$	$(\vartheta_0, e_r)$
耕作	0~8	0.599, 0.599	0.495, 0.582	0.390, 0.537	0.311, 0.517	0, 0.512
	18~26	0.606, 0.606	0.513, 0.595	0.434, 0.555	0.360, 0.533	0, 0.526
	40~46	0.567, 0.567	0.448, 0.558	0.346, 0.528	0.242, 0.509	0, 0.503
免耕	0~8	0.626, 0.626	0.511, 0.602	0.396, 0.550	0.328, 0.534	0, 0.53
	18~26	0.602, 0.602	0.473, 0.577	0.379, 0.540	0.342, 0.533	0, 0.532
	40~46	0.617, 0.617	0.546, 0.616	0.523, 0.611	0.321, 0.572	0, 0.557

注：表中 5 个点分别为收缩曲线的饱和点 $(\vartheta_s, e_s)$ 、湿润弯点 $(\vartheta_{shw}, e_{shw})$ 、进气点 $(\vartheta_{ac}, e_{ac})$ 、收缩限点 $(\vartheta_{shl}, e_{shl})$ 和干燥点 $(\vartheta_0, e_r)$ 。

表 6 给出了甘蔗地土壤 4 个收缩阶段的水分损失和体积变化状况。结合表 5 和表 6 可知，在耕作和免耕条件下，土壤线性收缩阶段部分在整个收缩过程的比例基本上是最大的，其占总体积变化的 46%~55%，占总水分损失的 13%~19%。土壤零收缩阶段部分的比例是最小的，其只占总体积变化的 1%~9%，占总水分损失的 43%~59%。但是耕作条件下的甘蔗地土壤残余收缩大于土壤的结构收缩，而免耕

条件下恰好相反。另外在免耕条件下 40~46 cm 土层的收缩情况与其他土层明显不同，其残余收缩阶段为主要收缩阶段，其次是零收缩阶段，再者是线性收缩阶段，最后是结构收缩阶段，其占土壤收缩过程中的体积比例分别为 65%、25%、8% 和 2%。耕作和免耕条件下的土壤体积含水量都随时间呈下降趋势，可能是颗粒和团聚体沉降硬化所致，但是两者下降速率不相同，说明耕作会改变土壤颗粒和土壤团聚体硬化的速率。

表 6 甘蔗地土壤 4 个收缩阶段的水分损失和体积变化(%)  
Table 6 Water loss and volume changes during four contraction stages of sugarcane soils

试验地	土层深度(cm)	$\vartheta_{ss}$	$\vartheta_{ps}$	$\vartheta_{rs}$	$\vartheta_{zs}$	$e_{ss}$	$e_{ps}$	$e_{rs}$	$e_{zs}$
耕作	0~8	17.36	17.53	13.19	51.92	19.54	51.72	22.99	5.75
	18~26	15.35	13.04	12.21	59.41	13.75	50.00	27.50	8.75
	40~46	20.99	17.99	18.34	42.68	14.06	46.88	29.69	9.38
免耕	0~8	18.37	18.37	10.86	52.4	25.00	54.17	16.67	4.17
	18~26	21.43	15.61	6.15	56.81	35.71	52.86	10.00	1.43
	40~46	11.51	3.73	32.74	52.03	1.67	8.33	65.00	25.00

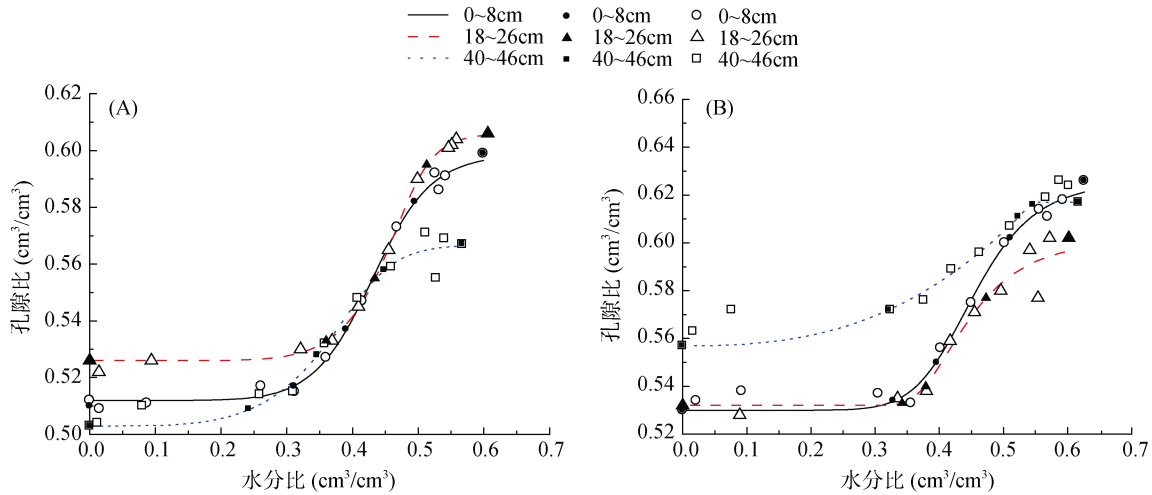
注：下标 ss, ps, rs, zs 分别表示结构收缩、线性收缩、残余收缩和零收缩。

图 1 是耕作与免耕条件下原状甘蔗地土壤在室内自然风干条件下的收缩曲线图，其中实心点为拟合曲线的 5 个拐点，空心点为实测值。由图 1 可知：随着甘蔗地土壤水分比逐渐降低，耕作与免耕条件下的土壤收缩曲线大致呈现“S”型。在耕作条件下，18~26 cm 土层对应的收缩曲线位于最上方，40~46 cm 土层对应的收缩曲线位于最下方。在免耕条件下，40~

46 cm 土层土壤收缩曲线位于收缩曲线的最上方，0~8 cm 和 18~26 cm 土层在水分比小于 0.40 时表现一致，当水分比大于 0.40 时，0~8 cm 土层收缩曲线位于 18~26 cm 土层之上，且两者之差逐渐拉大。当水分比小于 0.2 时，耕作条件下的甘蔗地土壤孔隙比保持不变；当水分比小于 0.3 时，免耕条件下的土壤孔隙比保持不变，该水分下的土壤孔隙比为最小孔隙

比。由图 1 可知,免耕条件下的最小孔隙比大于耕作条件下。耕作和免耕条件下的土壤最小孔隙比各不相同

,说明耕作在一定程度上能够改变土壤的最小土壤孔隙比以及最小孔隙比对应的水分比。



(A. 耕作条件, B. 免耕条件; 实心点为拟合曲线的 5 个拐点, 空心点为实测值)

图 1 甘蔗地土壤收缩曲线

Fig. 1 Sugarcane soil shrinkage curves in different depths under cultivation condition (A) and non-cultivation condition (B)

### 3 讨论

土壤收缩曲线拟合值和原状土壤样品实测值拟合程度高( $R^2 > 0.94$ ),且耕作和免耕条件下的土壤收缩特征曲线都呈现“S”型,这与 Peng 和 Horn<sup>[13]</sup>以及吕殿青和邵明安<sup>[18]</sup>对土壤收缩曲线的研究结果相一致。随着土壤水分比的不断降低,土壤线性伸展系数和土壤孔隙比逐渐减小,最后保持不变,说明土壤含水量能够影响土壤收缩。土壤中的水分能够影响土壤颗粒的分离与结合,在自然风干条件下,土壤水分逐渐减小,土体颗粒相互聚集结合在一起,土壤孔隙数量减小,土壤发生收缩,具体表现在土壤含水量越大,土壤线性伸展系数越大<sup>[19-20]</sup>。Peng 和 Horn 等<sup>[21]</sup>研究发现土壤收缩参数( $\chi$ 、 $p$ 、 $q$ )、土壤饱和孔隙比( $e_s$ )、线性伸展系数(COLE)与土壤质地和土壤有机质存在相关性,其中土壤饱和孔隙比( $e_s$ )、土壤线性伸展系数(COLE)与土壤有机质呈正相关,而 Gray 和 Allbrook<sup>[22]</sup>发现土壤收缩与土壤黏粒呈显著正相关,说明土壤收缩与土壤容重、土壤质地、土壤有机质含量等土壤理化性质有关。耕作和免耕条件下的表层土壤容重小,孔隙数量多,土壤收缩能力大,土壤线性伸展能力也越强,而中、下层土壤容重相对表层土壤容重大,土壤线性伸展能力也相对较弱,土壤的收缩能力随着土壤容重的增大而减小<sup>[23]</sup>。这与本研究中表层土壤线性伸展系数最大相一致。另外,土壤有机质不仅可以改善土壤胶体情况,增强土壤对水的吸附能力,同时还能提高土壤持水能力<sup>[24]</sup>。单秀枝等<sup>[25]</sup>

发现在土壤中吸力相同时,土壤有机质和土壤含水量呈正相关关系,土壤有机质含量越高其土壤持水能力越强。另外耕作条件下 18~26 cm 土层土壤的孔隙度最大,这主要是因为甘蔗根系主要集中在该层土壤,耕作处理促进了甘蔗根系的伸展和发育,根孔也是土壤孔隙的一种,土壤中的根系越发达土壤孔隙也就越多。土壤中孔隙数量的增多,不仅增大了孔隙内表面积,促进了土壤中水分蒸发,还改善了土壤结构,使得土壤更容易收缩<sup>[2]</sup>,这与图 1 中耕作条件下的 18~26 cm 土层收缩曲线相对应。

耕作条件下 3 层土壤收缩曲线分层明显,土壤收缩能力表现出 18~26 cm > 0~8 cm > 40~46 cm,在除 40~46 cm 土层外的整个收缩阶段,耕作条件下的结构收缩阶段和线性收缩阶段的体积变化总体上小于免耕条件下,而残余收缩阶段和零收缩阶段大于免耕。这说明甘蔗种植的耕作方式对土壤收缩具有一定程度的影响。Bandyopadhyay 等<sup>[26]</sup>通过对大豆-小麦、大豆-亚麻子和水稻-小麦地进行不同的耕作,发现不同的耕作方式对土壤裂隙的长度、深度、宽度和面积有着重要影响。相比于免耕条件下,耕作能够显著增加裂隙的宽度、深度和体积,减小裂隙的长度和表面积。Zhao 等<sup>[27]</sup>认为人为活动或外界因素的参与能够干扰土壤含水量空间分布,而土壤含水量是影响土壤收缩的重要因素之一。本研究结果表明免耕条件下的甘蔗地土壤含水量基本大于耕作条件下,这与黄永根等<sup>[28]</sup>在水稻田实施不同耕作方式后,土壤含水量小于未轮作前的结果相吻合。其次,相比于免耕条件下,

耕作条件下土壤黏粒含量增多,而砂粒含量和粉粒含量都有不同程度的减小。土壤中的黏粒含量越多,土壤的可塑性、黏结性以及胀缩性越好。Greene-Kelly<sup>[29]</sup>研究发现土壤收缩能力与土壤中胀缩性黏粒矿物质呈正相关关系,胀缩性黏粒含量越高,土壤收缩越明显。相比于免耕条件下,耕作条件下土壤中的黏粒含量高,土壤收缩能力大。另外,耕作条件下表层土壤经过人为的除草、施肥和灌溉等作用,使表层以下土壤被压实,容重大,使得深层土壤收缩能力减小<sup>[22]</sup>。最后,不同耕作条件下土壤的最小孔隙比不相同,其中耕作条件下土壤最小孔隙比小于免耕条件下,说明耕作能够改变土壤的最小孔隙比。通过对河南禹州的玉米地土壤进行为期8a的免耕试验,杨永辉等<sup>[30]</sup>也发现免耕能够显著提高土壤的孔隙数目和孔隙比。在耕作条件下,土壤中的大孔隙破碎,孔隙内表面积减小,抑制土壤水分通过土壤孔隙时的蒸发作用,降低了土壤优势流形成的可能,使得土壤中水分均匀入渗,提高了水肥的利用效率。

#### 4 结论

通过对耕作和免耕条件下甘蔗地原状土壤样品从饱和到风干过程中土壤收缩曲线拟合的研究发现:SSS 软件中的模型参数能够很好地拟合土壤收缩曲线的实测数据,土壤收缩曲线大致呈现“S”型,其中表层土壤的线性伸展系数最大,随着土壤含水量的不断降低,免耕条件下甘蔗地土壤伸展系数首先达到稳定。在耕作条件下,甘蔗地的土壤结构得到调节,土壤的理化性质得到改善,增强土壤的收缩能力。

#### 参考文献:

- [1] 程静,陶建平. 全球气候变暖背景下农业干旱灾害与粮食安全——基于西南五省面板数据的实证研究[J]. 经济地理, 2010, 30(9): 1524-1528
- [2] 张中彬,彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 477-488
- [3] Grdens A I, Simunek J, Jarvis N, et al. Two dimensional modeling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3): 647-660
- [4] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801-2811
- [5] 马蕊,甘磊,张静举,等. 不同作物类型下土壤收缩变化研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(12): 45-49
- [6] 金建新,桂林国,尹志荣,等. 宁夏典型土壤持水性能及收缩特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 279-283
- [7] 魏玉杰,吴新亮,蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 153-159
- [8] 邵明安,吕殿青. 土壤收缩特征曲线的实验研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 471-474
- [9] Du Y J, Li S L, Hayashi S. Swelling- shrinkage properties and soil improment of compacted expansive soil, Ni-Liang highway, China[J]. Engineering Geology, 1999, 53: 351-358
- [10] 杜长江,杨忠,熊东红,等. 土壤胀缩研究的现状与展望[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 269-270, 273
- [11] Peng X, Zhang Z B, Wang L L, et al. Does soil compaction change soil shrinkage behaviour?[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 125(9): 89-95
- [12] 广西来宾市地税局课题组. 广西制糖业发展困境及对策研究[J]. 经济研究参考, 2016(47): 64-68
- [13] Peng X, Horn R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 584-592
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 266-292
- [15] Zhang Z, Peng X, Wang L L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation[J]. Geoderma, 2013, 192(1): 12-20
- [16] Grossman R, Brasher B, Franzmeier D. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements[J]. Soil Science Society of America Journal, 1968, 32(4): 570-573
- [17] 魏翠兰,高伟达,李录久,等. 不同初始条件对砂姜黑土收缩特征的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 229-236, 271
- [18] 吕殿青,邵明安. 土壤干湿收缩特征研究进展[J]. 土壤通报, 2003(3): 225-228
- [19] 邢旭光,马孝义. 土壤失水过程对土体收缩特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 148-153
- [20] 郑思文,朱彦光,严磊,等. 桂林地区轮作与非轮作条件下水稻土收缩变化研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(2): 270-275
- [21] Peng X, Horn R. Identifying six types of soil shrinkage curves from a large set of experimental data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(2): 372-381
- [22] Gray C W, Allbrook R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils[J]. Geoderma, 2002, 108(3/4): 287-299
- [23] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1181-1188
- [24] 潘云,吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 59-61, 77
- [25] 单秀枝,魏由庆,严慧峻,等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 1-9
- [26] Bandyopadhyay K, Mohanty M, Painuli D, et al. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 71(2): 133-142

- [27] Zhao Y, Peth P, Krummelbein J, et al. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland[J]. *Ecological Modeling*, 2007, 205(1/2): 241–254
- [28] 黄永根, 杨豪, 王长军. 农田轮作对土壤结构的影响[J]. *农业装备技术*, 2016, 42(2): 23–24
- [29] Greene-Kelly R. Shrinkage of clay soils: A statistical correlation with other soil properties[J]. *Geoderma*, 1974, 11(4): 243–257
- [30] 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的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 1–11

## Research on Soil Shrinkage in Sugarcane Field of Karst Region in Guangxi

ZHENG Siwen<sup>1,2</sup>, LI Zhendong<sup>3</sup>, CHEN Xiaobing<sup>2,3</sup>, ZHANG Jinlian<sup>4</sup>,  
MA Rui<sup>3</sup>, CHEN Tingsu<sup>4</sup>, GAN Lei<sup>1,2\*</sup>

(1 *Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 2 *Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 3 *College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 4 *Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*)

**Abstract:** The dry and wet seasons are obvious in karst areas of Guangxi, which can result in the occurrence of cracks because of swelling and shrinking of dryland soil, thus, may change the storage and migration of water and nutrition in soil. In this paper, the sugarcane soils located in Guanxi Academy of Agricultural Sciences in Nanning was used to study the variation of linear extension coefficient of soils and to simulate the shrinkage curves of soils under the tillage and no-tillage conditions by the software of soil shrinkage simulator software (SSS). The results showed the SSS software could fit the measured data well ( $R^2 > 0.94$ ). Under the tillage and non-tillage conditions, the linear extension coefficient was significantly positively correlated with soil moisture content, which indicated that the higher soil moisture could result in greater linear extension coefficient and finally more obvious shrinkage of the sugarcane soil. Compared with the no-tillage condition, the tillage treatment could change the distribution of soil moisture, adjust soil structure, improve soil properties and enhance soil shrinkage. The above results could provide the reference to the sugarcane cultivation and preservation of soil water and fertility in the karst region, Guangxi.

**Key words:** Tillage method; Soil shrinkage; Linear extension; Shrinkage curve