

秸秆添加与土壤基质势对棕壤压缩回弹特性的影响

安 晶, 黎 明, 肖质秋, 虞 娜, 邹洪涛, 张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘要: 土壤板结是农田土壤退化问题之一, 秸秆还田是提高土壤有机质含量、改良土壤的重要措施。但秸秆还田和土壤基质势对土壤板结的影响尚不明确。试验设 0, 3, 5 g/kg 3 个秸秆添加量处理, 以及高(1 000 kPa)、中(100 kPa)、和低(10 kPa)3 个土壤基质势处理。通过固结试验, 测定不同处理的压缩曲线并计算压缩回弹特性指标。结果表明: 秸秆添加量、土壤基质势及其二者间的交互作用对压缩曲线最大曲率、预固结压力值、压缩指数和回弹指数的影响都达到显著性水平。预固结压力值、压缩指数和回弹指数均随着秸秆添加量的增加而增大, 而最大曲率则随着秸秆增加量的提高而降低。土壤基质势与压缩曲线最大曲率、预固结压力值和压缩指数均呈正相关关系。回弹指数随着土壤基质势的增加呈现先降低后增加的趋势。秸秆添加有助于提高土壤回弹和抗压缩特性。

关键词: 秸秆添加量; 土壤基质势; 预固结压力值; 压缩指数; 回弹指数; 最大曲率

中图分类号: S152.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0144-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.020

Effects of Straw Addition and Matric Potential on
Brown Soil Compression and Resilience

AN Jing, LI Ming, XIAO Zhiqiu, YU Na, ZOU Hongtao, ZHANG Yulong

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: Soil compaction is one of the problems of farmland soil degradation. Straw returning is an important measure to increase soil organic matter content and improve the soil. However, the effects of straw returning and soil matrix potential on soil compaction are still unclear. The experiment set three treatments with straw addition amount of 0, 3 and 5 g /kg, and three soil matrix potential treatments of 1 000, 100 and 10 kPa. The compression curves of different treatments were measured by the consolidation test and the compression and resilience characteristic indexes were calculated. The results showed that the effects of straw returning, soil matrix potential and their interaction on maximum curvature, pre-compression stress, compression index and resilience index reached significant levels. Pre-compression stress, compression index and resilience index all increased with the increasing of straw addition, while the maximum curvature showed the opposite trend. Soil matrix potential had a positive correlation with the maximum curvature, pre-compression stress and the compression index. With the increasing of soil matrix potential, resilience index decreased first and then increased. Straw addition could improve soil resilience and compression resistance.

Keywords: straw addition; matrix potential; pre-compression stress; compression index; resilience index; maximum curvature

土壤板结是传统农业和现代农业共同面临的一个重要问题。随着农业机械化程度提高, 由土壤板结造成的土壤退化面积正逐年增大。土壤板结将会导致土壤孔隙度降低、硬度增大和通气性降低等一系列问题^[1]。土壤板结的形成与土壤压缩回弹特性密切

相关。前人^[2]通常采用计算压缩曲线中的相关指标来评价土壤压缩回弹特性, 这些指标包括预固结压力值、压缩指数和回弹指数等。预固结压力值代表土壤的承压能力, 当外施压力超过预固结压力值时, 土壤发生塑性形变。压缩指数被认为是评价土壤板结敏

感性的指标,压缩指数越大,土壤发生板结的风险性越高^[3]。回弹指数表征土壤被压缩后膨胀回弹的能力,回弹指数越大,说明土壤被压缩后回弹能力越强^[4-5]。有机质含量及土壤水分是影响土壤板结的重要因素,但二者及其交互作用对土壤压缩回弹特性的影响的研究结果不尽相同。有研究^[6-8]表明,土壤预固结压力值、回弹指数均与有机质呈显著正相关关系。林琳等^[9]研究认为,黑土回弹指数未随有机质含量的增加而表现出明显的变化规律,有机质含量对相同压实程度土壤的恢复能力无显著影响;关于土壤水分对土壤压缩回弹指标的影响,有研究^[10-15]认为,土壤预固结压力值随着土壤基质势增加而增大。土壤基质势同压缩指数无相关性,但黑土的压缩指数同土壤基质势呈负相关关系^[16]。Lima等^[17]认为,土壤的压缩性与土壤含水量间呈现抛物线关系。Blanco-Canqui等^[18]研究指出,在相同含水量条件下,秸秆的添加将改变土壤的基质势。秸秆添加对土壤压缩特性的影响很可能是由于基质势的改变而造成的,从而掩盖了秸秆添加对土壤压缩特性的直接作用。因此,研究土壤基质势对土壤压缩特性的影响更具有意义。秸秆中含有丰富的有机物料且富有活力。秸秆还田是增加土壤有机质含量的重要措施之一,在农业生产中已经广泛应用。但是秸秆还田后,秸秆还田量和土壤基质势及其交互作用对土壤压缩回弹特性的影响尚不明确。本研究通过室内模拟固结试验,探讨土壤压缩回弹特性同秸秆添加量和土壤基质势间的关系,研究结果将为秸秆资源化利用和降低土壤板结风险提供理论依据和指导作用。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

自沈阳农业大学后山试验基地采集棕壤样品,采样深度为0—20 cm,容重为1.36 g/cm³。pH为5.70,有机质含量13.24 g/kg,颗粒组成:砂粒64.54%,粉粒9.81%,黏粒25.71%。土样经自然风干,挑除植物根系、动植物残体及其他异物,过2 mm筛,充分混匀后,装入保鲜袋中备用。装袋之前测定风干土的含水量。

1.2 试验设计

试验于2021年6月在室内且通风良好条件下进行。将秸秆粉碎成细末过60目筛,按照0,3,5 g/kg的比例添加于供试土壤中(相当于大田秸秆还田量0,7 800,15 000 kg/hm²),制备成不同秸秆添加量的供试土样,其相应代码分别为CK,AD3和AD5。以土壤基质势为试验因素,设高(1 000 kPa)、中(100 kPa)和低(10 kPa)3个水平。初始容重设定为1.30

g/cm³,2因素完全组合,共9个试验处理。

1.3 测定项目与方法

所用单个供试土样用容重环制作,容重环高2 cm,体积为60 cm³。为了确保单个供试土样内部密度均一,填装前先称取欲充填的湿土,分2层逐次填至容重环内。供试土样进行饱和后,通过水头法和压力膜仪控制土壤基质势,得到不同土壤基质势的供试土壤样品。

土壤压缩一回弹试验采用GZQ-1型全自动气压固结仪进行。按照12.5,25,50,75,100,150,200,150,100,75,50,25,12.5,25,50,75,100,150,200,400,800,1 200,1 600 kPa荷载次序对试样施加压力(σ),每个压强下持续10 min,记录土壤形变量并计算对应孔隙比(e),得到压缩曲线、回弹曲线和再压缩曲线,每个处理3次重复。

1.4 土壤压缩回弹特性指标的计算

利用Gompertz方程对压缩曲线进行拟合^[19]:

$$e = a + c \exp\{-\exp[b(\log \sigma - m)]\} \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 和 m 为拟合参数。

压缩指数(C_c)计算公式^[19]为:

$$C_c = \frac{bc}{\exp(1)} \quad (2)$$

压缩曲线曲率(k)计算公式^[19]为:

$$k = \frac{d^2 e / d (\log \sigma)^2}{[1 + (de / d (\log \sigma)^2)]^{3/2}} \quad (3)$$

令公式(3)的二阶导数为0,即可求得土壤压缩曲线最大曲率($k_{\max}$)处的压力值(σ),即预固结压力值(σ_p , kPa)。

回弹指数 C_s 为回弹曲线和再压缩曲线两交点斜率。

1.5 基于主成分分析的土壤压缩回弹特性综合评价模型

不同秸秆添加量和土壤基质势处理下土壤压缩回弹特性指标(最大曲率、预固结压力值、压缩指数和回弹指数)组成矩阵进行主成分分析,选取累积百分率 $\geq 75\%$ 的主成分因子,选取主成分的特征向量构成主成分方程。再根据主成分贡献率,构建土壤回弹和抗压缩特性的综合评价模型。

1.6 数据处理

采用SPSS 24软件进行单因素及二因素方差分析,处理间差异显著性用Duncan单因素方差分析法。使用Matlab 2016最小二乘法lsqcurvefit函数对压缩、回弹和再压缩曲线进行拟合,并计算压缩指数和回弹指数。采用R Soilphysics包计算最大曲率和预固结压力值。采用主成分分析法,构建综合模型来反映秸秆添加量和土壤基质势对土壤回弹和抗压

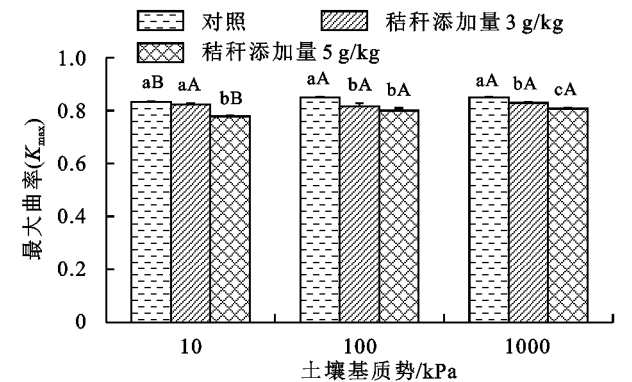
缩特性的影响。使用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 压缩曲线的最大曲率

压缩曲线最大曲率是压缩曲线由“弹性”向“塑性”阶段过渡部分的斜率,它的数值大小代表着土壤受外力作用下失去弹性的快慢及发生土壤板结的速度。

相同基质势条件下,最大曲率随秸秆添加量变化规律相同,即随着秸秆添加量的增加,最大曲率呈下降趋势(图 1)。同 CK 相比,AD5 处理显著降低了最大曲率($p<0.05$)。在中高基质势条件下,AD3 处理对最大曲率的影响差异显著($p<0.05$)。但是在低基质势条件下,AD3 处理对最大曲率无显著影响($p>0.05$)。在中基质势条件下,AD3 和 AD5 处理对最大曲率影响不显著($p>0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示相同基质势条件下不同秸秆添加量间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同秸秆添加量条件下不同基质势间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 秸秆添加量和土壤基质势对土壤压缩曲线最大曲率的影响

相同秸秆添加量条件下,土壤压缩曲线最大曲率随土壤基质势的增加总体呈现上升趋势(图 1)。AD5 处理下,中高基质势处理下的最大曲率显著高于低基质势处理下的最大曲率($p<0.05$)。AD3 处理下,各基质势处理对最大曲率影响差异不显著($p>0.05$)。

双因素方差分析结果表明,秸秆添加量与土壤基质势对土壤压缩曲线最大曲率影响的差异显著($p<0.05$),但二者的交互作用对最大曲率的影响未达到显著性水平($p>0.05$)(表 1)。

表 1 秸秆添加量及土壤基质势对土壤压缩曲线最大曲率的方差分析				
处理	自由度	F	p	
秸秆添加量	2	48.61	0	
土壤基质势	2	6.58	0.01	
秸秆添加量×土壤基质势	4	2.00	0.14	

2.2 预固结压力值

预固结压力值(σ_p)被认为是受到外力作用后,土

壤形变由弹性阶段向塑性阶段转变的压力值分界点(kPa),其数值越大,则该土壤抵抗外力压缩、保持原有结构不变的能力越强。不同秸秆添加量和土壤基质势处理下,预固结压力值的变化范围为 42.34~71.07 kPa,秸秆添加量为 3 g/kg、土壤基质势为 1 000 kPa 时,预固结压力值最大(图 2)。

低基质势条件下,AD3 处理下的预固结压力值显著高于 CK 处理,但同 AD5 处理差异不显著。中基质势条件下,同 CK 相比,AD5 处理显著提高预固结压力值。但在高基质势条件下,秸秆添加处理对预固结压力无显著影响。

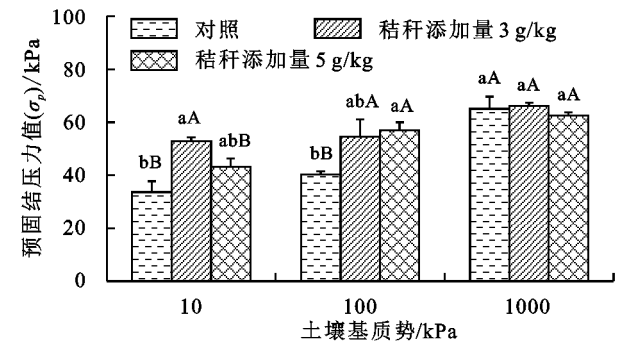


图 2 秸秆添加量和土壤基质势对预固结压力值的影响

相同秸秆添加量处理下,预固结压力值随着土壤基质势的增加而增大(图 2)。同 CK 相比,AD3 处理下,土壤基质势对预固结压力值的影响差异不显著,但比 CK 处理在相同基质势条件下的预固结压力值分别增加了 57.57%,35.45%和 1.50%。当土壤基质势为 100 kPa 时,AD5 处理的预固结压力值显著高于 CK 处理。

双因素方差分析结果(表 2)表明,秸秆添加量、土壤基质势以及二者间的交互作用均显著影响土壤预固结压力($p<0.05$)。

表 2 秸秆添加量及土壤基质势对压缩指数的方差分析				
处理	自由度	F	p	
秸秆添加量	2	8.74	0	
土壤基质势	2	29.71	0	
秸秆添加量×土壤基质势	4	3.11	0.04	

2.3 压缩指数

压缩指数(C_c)为压缩曲线的塑性阶段土壤体积随外力(荷载压强)增加的变化速率,其数值越大,土壤可压缩性越高,对外力作用越敏感,发生土壤板结的风险越高。

土壤基质势不同,压缩指数随秸秆添加量变化的趋势也不同。低基质势条件下,压缩指数随着秸秆添加量增加呈先上升后下降的趋势,但 AD3 和 AD5 处理下压缩指数差异不显著($p>0.05$)。中基质势条件下,压缩指数随着秸秆添加量的增加而增

大,同 CK 相比,AD3 和 AD5 处理下压缩指数分别提高了 16.49%和 19.03%。高基质势条件下,压缩指数随着秸秆添加量增加先减小后增大,AD3 处理下压缩指数最小(图 3)。

CK 和 AD5 处理下,压缩指数随着土壤基质势的升高呈现上升趋势。AD3 处理下的压缩指数随土壤基质势变化趋势与之相反。AD3 和 AD5 处理下,土壤基质势对土壤压缩指数的影响差异不显著($p>0.05$)(图 3)。

双因素方差分析结果(表 3)表明,秸秆添加量和土壤基质势对压缩指数的影响均到达显著性差异($p<0.05$),且二者的交互作用对压缩指数的影响也达到显著性水平($p<0.05$)。

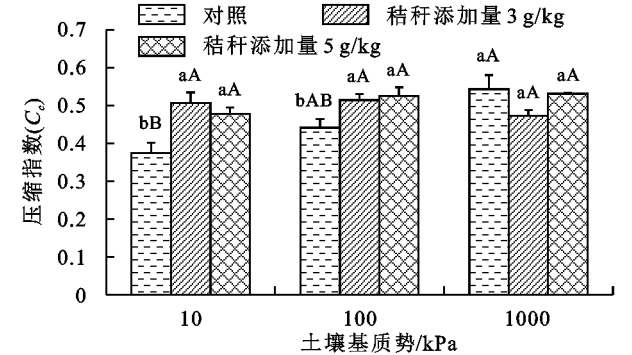


图 3 秸秆添加量和土壤基质势对压缩指数的影响

表 3 秸秆添加量及土壤基质势对压缩指数的方差分析

处理	自由度	<i>F</i>	<i>p</i>
秸秆添加量	2	5.35	0.02
土壤基质势	2	5.80	0.01
秸秆添加量×土壤基质势	4	5.27	0.01

2.4 回弹指数

由回弹曲线和再压缩曲线确定的土壤回弹指数,数值越大,表明该土壤被压缩后膨胀回弹的能力越强。如图 4 所示,相同基质势条件下,回弹指数有随秸秆添加量增加而增大的趋势。AD3 和 AD5 处理下的回弹指数均高于对照处理,且差异达到显著性水平($p<0.05$)。但 AD3 和 AD5 处理下的回弹指数无显著性差异。

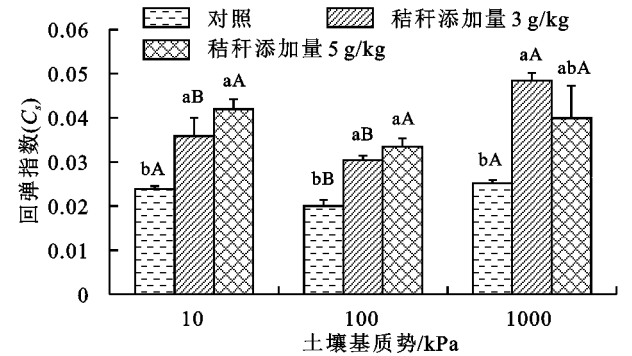


图 4 土壤秸秆添加量和土壤基质势对回弹指数的影响

相同秸秆添加量处理下,回弹指数均在中基质势条件下有最小值。AD3 处理下,高基质势条件下的回弹指数显著高于中低基质势条件下压缩指数;AD5 处理下,各基质势处理间的压缩指数差异不显著($p>0.05$)。

双因素方差分析结果(表 4)表明,秸秆添加量与土壤基质势对土壤回弹指数影响的差异性达到极显著水平($p<0.01$)。但秸秆添加量与土壤基质势二者的交互作用对土壤回弹指数的影响差异不显著($p>0.05$)。

表 4 秸秆添加量及土壤基质势对土壤回弹指数的方差分析

处理	自由度	<i>F</i>	<i>p</i>
秸秆添加量	2	24.02	0
土壤基质势	2	7.80	0
秸秆添加量×土壤基质势	4	1.91	0.15

2.5 土壤压缩回弹特性综合评价

压缩曲线的最大曲率、预固结压力值、压缩指数和回弹系数 4 个指标从不同的方面来评价土壤的回弹和抗压缩特性,但是结论不统一。因此,综合评价土壤的回弹和抗压缩特性十分必要。

以基本特征值大于 1 取得 2 个主成分,累计贡献率达 77.7%。利用 2 个主成分各指标相对应的特征向量值建立 2 个主成分的函数表达式: $Z_1=0.539\sigma_p+0.527C_c-0.544C_s-0.369k_{max}$ 和 $Z_2=0.493\sigma_p+0.362C_c-0.362C_s+0.704k_{max}$ 。根据主成分贡献率,土壤回弹和抗压缩特性的综合评价模型为: $Z=0.483\times Z_1+0.294\times Z_2$ 。

由图 5 可知,中低基质势条件下,同 CK 相比,秸秆添加了提高 Z 值,但 AD3 和 AD5 处理间差异不显著。高基质势条件下,秸秆添加量各处理间的 Z 值差异不显著。相同秸秆添加量条件, Z 值随着土壤基质势的增加而增大。其中,AD5 处理下,高基质势和低基质势条件下的 Z 值差异显著($p<0.05$)。

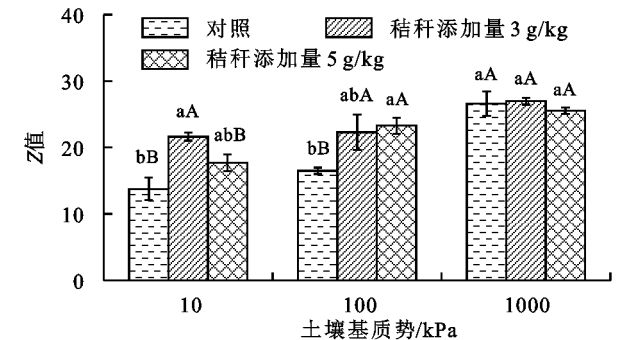


图 5 秸秆还田量和土壤基质势对土壤回弹和抗压缩能力的影响

进一步分析秸秆还田量和土壤基质势对 Z 值的影响,结果表明,秸秆添加量、土壤基质势及二者间的交互作用均显著影响 Z 值($p<0.05$)(表 5)。 Z 值越高,说明土壤回弹和抗压缩能力越强;反之,则表示土壤回弹和抗压缩能力低。

表 5 秸秆添加量及土壤基质势对 Z 值的方差分析

处理	自由度	F	p
秸秆添加量	2	8.84	0
土壤基质势	2	29.93	0
秸秆添加量×土壤基质势	4	3.16	0.04

3 讨论

最大曲率受到边界条件的影响,与初始孔隙比呈正相关关系^[3],即供试土壤越疏松,则压缩曲线最大曲率也越大,由弹性阶段过渡到塑性阶段变化越迅速,这与本研究前提有所不同。本研究中,初始容重相同,即初始孔隙度相同,最大曲率只受到有机质和土壤基质势的影响。相同土壤基质势条件下,土壤最大曲率随着秸秆添加量的增加而降低,即土壤的抗压性能随着秸秆添加量增加而不断提高,土壤由弹性向塑性过渡的较为平缓。这可能是由于作为有机质重要来源的秸秆,进入到土壤中作为有弹性的物质而起作用。有机质是多种大分子有机化合物的复合体,具有良好的伸缩性;在受到外力作用时会表现出可压缩性,而当外力撤去之后又会使土壤显现出较大的弹性^[20],据此有学者^[21]认为,有机质是土壤中的“减震器”。虽然秸秆的添加增加了弹性,但是从孔隙上来看,秸秆添加可能提高了中等大小孔隙的数量,因此随着土壤基质势的增加,孔隙水压力和有效压力下降,抗压能力降低,从而增大了最大曲率。

前人^[14]研究表明,含水量低的土壤具有较高的预固结压力值。提高土壤的预固结压力值,降低压缩指数,将大大降低土壤板结的风险。本研究中,预固结压力值和压缩指数同秸秆添加量和土壤基质势均呈现正相关关系。预固结压力值随着土壤基质势的增加而增大,主要原因可能是孔隙内水分降低,或者包裹在土壤颗粒表面的水膜变薄,土壤颗粒间触点上的水膜弯月面力增大所致^[22]。水膜弯月面将颗粒拉到一起,其有效应力及接触点数量的不同最终导致了在不同基质势条件下预固结压力值的差异。秸秆添加量的增加可能提高了颗粒间的摩擦力以及硬度^[20,23],从而提高了土壤承压能力。压缩指数同秸秆添加量总体呈现正相关关系,这可能是因为秸秆未腐解前,秸秆添加体现出的是自身弹性,增加了土壤的可压缩性,因此随着秸秆添加量的增加,压缩指数随之增大。当土壤基质势较高、水分含量较低时,大多数孔隙内的水分排出,土壤孔隙中水分无法承担作用于土壤中的部分外力,包裹在颗粒表面的水膜也丧失了润滑和缓冲的作用^[24],因此压缩指数随之增大。

同样受到秸秆自身弹性影响的还有回弹指数,回

弹指数随着秸秆添加量的增加而增大,抗压性能提高;随着土壤基质势的增加,回弹指数呈现先降低后增大的趋势。这可能是因为当土壤基质势较低(10 kPa),含水量较高时,包被颗粒的水膜厚、土粒之间距离较大,此时受到外力作用后除土壤颗粒间易于滑动外,存在于其间的水分也会起到支撑作用,结果使土壤变得不易被压缩。随着土壤基质势增加(100 kPa),黏粒受到压实作用后极易发生定向排列而变得紧实、回弹系数下降;当水分含量很低时(1 000 kPa),土壤颗粒之间的黏结力和摩擦力都很强,表现出不易被压缩的特性,回弹系数再次增加^[25]。

4 结论

(1)秸秆添加量、土壤基质势及二者间的交互作用对土壤压缩曲线最大曲率、压缩指数和回弹指数的影响都达到显著性水平。

(2)预固结压力值、压缩指数和回弹系数总体呈现随着秸秆添加量的增加而增大的趋势,而最大曲率则随着秸秆添加量的提高而降低。

(3)土壤基质势同压缩曲线最大曲率、预固结压力值和压缩指数呈现正相关关系。回弹指数随着土壤基质势的增加呈现先降低后增加的趋势。

(4)通过主成分分析构建模型,综合评价土壤基质势和秸秆添加量对土壤回弹和抗压缩特性的影响可知,添加秸秆可以提高中低土壤基质势条件下的土壤回弹和抗压缩特性。

参考文献:

[1] Jimenez K J, Rolim M M, Gomes I F, et al. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: e104847.

[2] Toledo M S, Rolim M M, de Lima R P, et al. Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: e105072.

[3] Keller T, Lamande M, Schjonning P, et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests [J]. Geoderma, 2011, 163(1): 13-23.

[4] Corstanje R, Deeks L R, Whitmor A P, et al. Probing the basis of soil resilience [J]. Soil Use and Management, 2015, 31(S1): 72-81.

[5] Gubiani P I, Pertile P, Reichert J M. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 29-37.

[6] Alaoui A, Rogger M, Peth S, et al. Does soil compaction increase floods? A review [J]. Journal of Hydrolo-

- gy, 2018, 557: 631-642.
- [7] Zhand B, Horn R, Hallett P D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 864-871.
- [8] 韩少杰, 王恩姮, 陈祥伟, 等. 开垦对黑土表层土壤压缩—回弹行为的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 646-653.
- [9] 林琳, 韩少杰, 王恩姮. 有机质与黏粒含量对黑土压缩—回弹特性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1138-1147.
- [10] Ajayi A E, Dias Junior M D S, Curin, et al. Strength attributes and compaction susceptibility of brazilian latosols [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(1): 122-127.
- [11] Cui K, Defosse P, Cui Y j, et al. Quantifying the effect of matric suction on the compressive properties of two agricultural soils using an osmotic oedometer [J]. Geoderma, 2010, 156(3): 337-345.
- [12] Gut S, Chervet A, Stettler M, et al. Seasonal dynamics in wheel load-carrying capacity of a loam soil in the swiss plateau [J]. Soil Use and Management, 2015, 31(1): 132-141.
- [13] Moraes M T D, Luz F B D, Debiassi H, et al. Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 128-134.
- [14] Rucknagel J, Christen O, Hofmann B, et al. A simple model to estimate change in precompression stress as a function of water content on the basis of precompression stress at field capacity [J]. Geoderma, 2012, 177/178: 1-7.
- [15] Reichert J M, Mentges M I, Rodrigues M F, et al. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture [J]. Catena, 2018, 165: 345-357.
- [16] An J, Zhang Y L, Yu N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 145: 216-223.
- [17] De Lima R P, Da Silva A P, Giarola N F B, et al. Impact of initial bulk density and matric suction on compressive properties of two oxisols under no-till [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 168-177.
- [18] Blanco-Canqui H, Hergert G W, Nielsen R A. Cattle manure application reduces soil compactibility and increases water retention after 71 years [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(1): 212-223.
- [19] Gregory A S, Whalley W R, Watts C W, et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(1): 45-57.
- [20] Soane B D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects [J]. Soil and Tillage Research, 1990, 16(1): 179-201.
- [21] Faloye O T, Ajayi A E, Zink A, et al. Effective stress and pore water dynamics in unsaturated soils: Influence of soil compaction history and soil properties [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211: e104997.
- [22] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils [J]. Géotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [23] Gupta S C, Dowdy R H, Larson W E. Hydraulic and thermal properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(3): 601-605.
- [24] 霍连飞, Adam B E, 丁启朔, 等. 采用 Gompertz 函数的水稻土压缩特性研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 136-142.
- [25] Gregory A S, Watts C W, Ggiffiths B S, et al. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England [J]. Geoderma, 2009, 153(1): 172-185.