

# 初始含水量和容重对黑土压缩特性的影响

高 晨<sup>1,2</sup>, 李晓鹏<sup>1</sup>, 张红霞<sup>1</sup>, 蒋一飞<sup>1,2</sup>, 谢 越<sup>3</sup>, 刘建立<sup>1,4\*</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 4. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

**摘 要:** 东北黑土区农业机械化水平高, 农机作业压实导致的土壤结构和物理性状退化问题日益严重, 压缩特性是定量分析土壤压实过程的有效手段, 但目前黑土压缩特性随初始含水量和初始容重的变化规律尚不明确。为了解初始含水量和初始容重对黑土压缩特性的影响程度及其变化关系, 该研究以重塑黑土为对象, 设 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 g/g 共 6 个初始含水量水平, 设 1.00、1.10、1.20、1.30、1.45、1.60 g/cm<sup>3</sup> 共 6 个初始容重水平, 使用固结仪进行单轴压缩试验测定土壤压缩曲线, 分析初始含水量和容重对压缩特性影响。结果表明, 土壤初始含水量、容重及两者交互作用均极显著影响重塑黑土压缩特性 ( $P<0.001$ ), 据此建立了预测压缩特性的土壤传递函数。黑土的预固结压力为 10.42~110.617 kPa, 与初始含水量显著线性正相关、与初始容重显著线性负相关 ( $P<0.05$ ); 压缩指数为 0.311~0.852, 与初始含水量和容重呈二元多项式方程的关系, 随初始容重的增大而降低, 在中等含水量时最大; 回弹指数为 0.007~0.321, 与初始含水量正相关, 与初始容重负相关。初始含水量大于 70% 田间持水量或初始容重小于 1.20 g/cm<sup>3</sup> 时, 土壤预固结压力小于 200 kPa 且压缩指数大于 0.4, 压实风险高, 应避免田间作业。建立的土壤传递函数可以较好地预测黑土压缩特性, 还可用于土壤压实模型评估农机作业压实风险, 为适耕性判断提供参考。

**关键词:** 土壤; 模型; 含水量; 传递函数; 容重; 压缩特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303108

中图分类号: S152.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0102-10

高晨, 李晓鹏, 张红霞, 等. 初始含水量和容重对黑土压缩特性的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 102-111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303108 <http://www.tcsae.org>

GAO Chen, LI Xiaopeng, ZHANG Hongxia, et al. Effects of initial moisture and bulk density on the soil compression characteristics of black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 102-111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303108 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

农田土壤压实是由于施加载重、振动或压力导致土壤颗粒重新排列, 从而使土壤孔隙度降低和容重增加的过程<sup>[1-2]</sup>。耕地土壤是重要的农业生产资源, 随着农业机械化水平的不断提高, 农机质量和作业强度的增加加剧了压实问题, 制约了农业的可持续发展<sup>[3-5]</sup>。中国关中平原、华北平原、长三角农业区和南方红壤区土壤压实问题均已存在<sup>[6-9]</sup>, 而东北黑土区由于土壤容重小、农业机械化程度高更易受到压实胁迫, 从而导致作物大幅减产<sup>[10]</sup>。通过土力学指标 (如预固结压力等) 来表征土壤压实状况是国内外土壤压实领域研究的关注点<sup>[11]</sup>。20 世纪 90 年代起, 研究者<sup>[12-13]</sup>开始通过压缩曲线定量分析农田土壤压实过程, 并据此求得土壤压缩特性参数: 预固结压力、压缩指数和回弹指数。用预固结压力量化土壤的承压能力极限, 用压缩指数判断土壤压实敏感性, 用回弹

指数表示土壤被压实后恢复至压缩前状态的能力。压缩曲线及特性参数可以用于量化和评估压实风险发生的可能性, 预测变形后土壤结构的可恢复性<sup>[14-17]</sup>。

土壤压缩特性主要受到土壤水力状态和土体结构的影响<sup>[12-13]</sup>。水力状态常用含水量和基质势量化<sup>[18]</sup>, 土体结构包括宏观性质如容重、孔隙比, 以及微观结构如土壤颗粒、团聚体等<sup>[19]</sup>。含水量和容重是影响土壤压实的重要因素, 但二者及其交互作用对土壤压缩特性的影响的研究结论不尽相同。有研究<sup>[20-22]</sup>认为预固结压力与容重正相关, 与含水量负相关, 但也有研究<sup>[19]</sup>表明预固结压力与含水量在黏土上相关性较好, 但在砂土上相关关系不明显。关于压缩指数的研究尚无定论, REICHERT 等<sup>[22]</sup>认为容重增大导致压缩指数降低, 水分含量降低则压缩指数增加。AN 等<sup>[21]</sup>发现土壤压缩指数随初始容重增加而降低, 在黑土上随初始含水量增加而增大, 在棕壤上则未表现出明显的规律性。回弹指数与含水量和容重间的关系未有统一结论, de LIMA 等<sup>[23]</sup>研究表明, 回弹指数随容重的减小而增大, 霍连飞等<sup>[8]</sup>发现水稻土回弹指数与容重线性负相关, 与含水量线性正相关。由此可见, 不同土壤类型间各压缩特性参数差异较大, 需要针对性地构建土壤传递函数, 以改进对土壤压实风险的预测效果。

东北黑土区是中国综合农业机械化程度最高的区域, 2021 年中国农作物耕种收综合机械化率达到 72.03%, 黑龙江省更是高达 98%<sup>[24-25]</sup>。土壤压实与农业机械使用存

收稿日期: 2023-03-17 修订日期: 2023-04-30

基金项目: 中国科学院黑土地保护与利用科技创新工程专项 (XDA28010401); 国家重点研发计划项目 (2022YFD1500502); 中国工程院战略研究与咨询项目 (2022-XY-96)

作者简介: 高晨, 研究方向为农机压实土壤过程。

Email: gaochen@issas.ac.cn。

※通信作者: 刘建立, 博士, 研究员, 研究方向为农田信息获取与监测技术。Email: jlliu@issas.ac.cn。

在显著相关关系, 因此土壤压实正逐渐成为限制东北农业生产的突出问题<sup>[26-27]</sup>。目前, 黑土区关于土壤压缩特性的研究主要集中在有机质和黏粒含量的影响方面, 对初始含水量和容重与3个压缩特性参数(预固结压力、压缩指数和回弹指数)间关系的研究较少, 变化关系尚不明确。为了探究黑土压缩特性与初始含水量和初始容重的关系, 量化黑土压实难易程度, 评估压实风险发生的可能性, 本研究以长期机械耕作的农田黑土为研究对象, 人工配制不同初始含水量和容重处理的重塑土样, 通过单轴压缩试验测定压缩曲线, 计算压缩特性参数, 研究初始含水量和容重对土壤压缩曲线和压缩特性的影响, 并建立估测压缩特性的土壤传递函数, 以期对东北黑土区耕地土壤压缩特性分析和压实风险评估提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

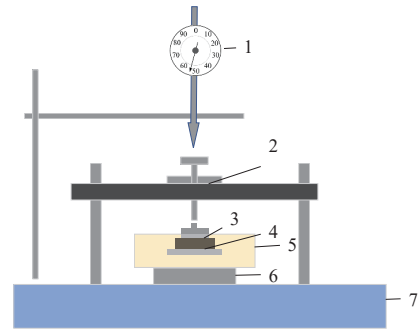
试验所需黑土于2021年秋季取自黑龙江省海伦市胜利村(126°79'E, 47°43'N)农田土壤, 取样深度为0~20 cm。土壤为中厚黑土, 其母质为第四纪形成的黄土状母质, 质地为粉砂质黏壤土(美国制)。海伦耕地的表层土壤黏粒矿物以水云母、绿泥石、蛭石等2:1型非膨胀性黏土矿物为主, 常量元素以SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O为主, 四者质量分数之和达到88.32%<sup>[28-29]</sup>。将采集的土壤自然风干, 挑出植物根系和其他异物后破碎, 研磨过2 mm筛备用。供试土壤pH值为6.66, 砂粒、粉粒、黏粒、有机质质量分数分别为13.40%、57.00%、29.60%和6.75%。参照《土工试验方法标准: GB/T 50 123-2019》<sup>[30]</sup>测定界限含水率, 液限为0.23 g/g, 塑限为0.36 g/g。

### 1.2 试验设计与方法

采用双因素交互试验设计, 以土壤初始含水量和初始干容重为试验因素设计处理水平。根据前期无机机械压实农田调查结果, 0~20 cm土层在旋耕后的容重为1.04 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量0.36 g/g; 春季播种前容重为1.24 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量0.36 g/g。综合考虑耕作区土壤多年平均容重及当地水分变化特征<sup>[31-32]</sup>, 设计以下水平: 含水量设0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 g/g共6个水平; 干容重设1.00、1.10、1.20、1.30、1.45、1.60 g/cm<sup>3</sup>共6个水平, 两因素完全组合, 总计36个处理, 每个处理重复4次。考虑到试验过程中土壤实际含水量和容重可能发生变化, 将设计土壤水分含量和容重称为“初始含水量”和“初始干容重”。为了表述方便, 未做特别说明时, 本文所指含水量和容重均为初始含水量和初始干容重。

参照文献<sup>[33]</sup>的方法制备重塑土样, 称取相应容重的供试土壤, 用手动压力机(乾泰多功能手动压力机, 东莞)将其填装到滤纸兜底的环刀(标准60 cm<sup>3</sup>钢环刀, 直径61.8 mm, 高度20 mm, 绍兴)中, 然后将环刀土样置于盛水的塑料筐中, 保持水位超过环刀2/3高度处但未浸没, 土样吸水至完全饱和后, 将其转移至土工透水石上失水, 期间反复测量土样质量, 直至达到目标含水量, 之后立即将土样转移到自封袋中密封保存48 h, 以保证其内部水分均匀分布。

使用全自动气压固结仪(GZQ-1型, 南京土壤仪器)进行单轴压缩试验, 装置如图1所示。试验根据《土工试验方法标准》(GB/T 50 123-2019)<sup>[31]</sup>中规定的步骤进行。施加荷载序列为12.5、25.0、50.0、100.0、200.0、300.0、400.0、600.0、800.0、1000.0、1200.0和1600.0 kPa。除1600.0 kPa外, 各级荷载固结时间均为1 h, 在每个加载间隔结束时测量应变且不进行恢复, 数据采集系统记录每一级荷载施加后供试土样发生的垂直位移量( $d_i$ , mm)。1600 kPa加载1 h后 $d_i < 0.005$  mm时视为固结稳定。在此基础上测得各级荷载下土样累计变形量并计算相应孔隙比( $e_i$ )。



1.百分表位移传感器 2.加压框架 3.土样 4.透水石 5.护环 6.传压板 7.固结仪底座

1. Dial displacement sensor 2. Compression frame 3. Soil sample 4. Permeable stone 5. Guard ring 6. Pressure transfer platform 7. Consolidator base

图1 土壤单轴压缩试验装置示意图

Fig.1 Diagram of the uniaxial confined compression test of soil

### 1.3 数据统计

参考AN等<sup>[21]</sup>的方法, 用Gompertz方程拟合压缩曲线, 即孔隙比 $e$ 与施加荷载 $\sigma$  (kPa)的半对数关系 $e$ - $\lg \sigma$ 曲线。土壤压缩曲线可用2条近似直线表示: 回弹线和原始压缩线<sup>[16]</sup>, 据此可以计算土壤压缩特性: 回弹指数、压缩指数和预固结压力。

孔隙比 $e$ 计算式<sup>[16]</sup>为

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho} \frac{H - \sum d_i}{H} - 1 \quad (1)$$

式中 $\rho_s$ 为土粒密度, 2.65 g/cm<sup>3</sup>;  $\rho$ 为土样的初始容重, g/cm<sup>3</sup>;  $H$ 为土样的初始高度, cm;  $\sum d_i$ 为某一级荷载下的累计变形量, cm。

采用Gompertz方程<sup>[14]</sup>拟合压缩曲线:

$$e = a + c \cdot \exp\{-\exp[b \cdot (\lg \sigma - m)]\} \quad (2)$$

式中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $m$ 为拟合系数;  $\sigma$ 为单轴压缩试验施加荷载, kPa。

在已有研究中, 回弹指数可以从加载路径、卸载路径或再加载路径获得<sup>[16,23,34-36]</sup>, 得到的回弹指数值略有不同。本文通过加载路径测定回弹指数, 即土壤压缩曲线低压力段的回弹线平均斜率<sup>[16]</sup>, 计算式如下:

$$C_s = \frac{e_0 - e_{25}}{\lg(25)} \quad (3)$$

式中 $C_s$ 为回弹指数, 无量纲;  $e_0$ 为初始孔隙比;  $e_{25}$ 为施加25 kPa荷载对应的孔隙比。

压缩指数 $C_c$  (无量纲)是压缩曲线拐点处斜率的模<sup>[16]</sup>, 即式(2)在 $\lg \sigma = m$ 时的一阶导数绝对值, 计算式如下:

$$C_c = \frac{bc}{\exp(1)} \quad (4)$$

采用最大曲率法<sup>[14]</sup>计算预固结压力 ( $\sigma_{pc}$ , kPa), 即土壤压缩曲线上最大曲率点对应的荷载, 曲率  $k$  计算式如下:

$$k = \frac{d^2e/d(\lg\sigma)^2}{\{1 + [de/d(\lg\sigma)]^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

为方便试验数据批量输入、曲线拟合和结果可视化, 利用 Python 3.9 的 NumPy、Pandas、Matplotlib 库自行开发了土壤压实曲线模型软件 pySCC。由于 Gompertz 方程为非线性函数, 在利用实测数据点拟合方程时, 软件采用了非线性最小二乘法 (LeastSQ 函数) 进行参数优化。选取决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 ( $S_{RMSE}$ ) 和平均绝对百分比误差 ( $S_{MAPE}$ )<sup>[37]</sup> 评估 Gompertz 方程的拟合效果和土壤传递函数的精度。 $R^2$  越大、 $S_{RMSE}$  和  $S_{MAPE}$  越低, 则预测精度越高。

采用 SPSS 25.0 进行方差分析和回归分析, 用 Duncan 法进行多重比较, 对显著性差异进行统计学分析。用 OriginPro 2017C 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同初始含水量和初始容重下的压缩曲线

表 1 为不同初始含水量与初始容重处理下的 Gompertz 方程评价指标及拟合参数, 图 2 为不同处理下的土壤压缩曲线, 可以看出 Gompertz 方程对不同处理供试土样的试验数据拟合精度良好, 拟合决定系数  $R^2$  值最低为 0.995, 均方根误差  $S_{RMSE}$  最大为 0.006, 平均绝对百分比误差  $S_{MAPE}$  为 0.222%~3.887%。Gompertz 方程中各拟合系数的取值范围为:  $a \leq 0.659$ ,  $b=1.098 \sim 3.506$ ,  $c=0.369 \sim 1.284$ ,  $m=1.858 \sim 3.473$ 。该方程中,  $a$  近似对应于曲线的下渐近线即残余孔隙比,  $a+c$  对应于上渐近线即初始孔隙比<sup>[14]</sup>。

表 1 不同初始容重和初始含水量处理的 Gompertz 方程评价指标及拟合参数

Table 1 Evaluation indexes and fitted parameters of the Gompertz equation at different initial bulk density and initial moisture

初始容重 Initial bulk density $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	初始含水量 Initial moisture $w/(g \cdot g^{-1})$	Gompertz 方程拟合系数 Fitted parameters of Gompertz equation				$R^2$	$S_{RMSE}$	$S_{MAPE}/\%$
		$a$	$b$	$c$	$m$			
1.00	0.15	0.525	1.749	1.129	2.393	1.000	0.002	0.736
1.00	0.20	0.528	1.547	1.117	2.397	0.998	0.004	1.625
1.00	0.25	0.568	1.951	1.074	2.192	0.999	0.004	1.415
1.00	0.30	0.486	1.740	1.178	2.159	0.998	0.005	1.756
1.00	0.35	0.659	1.808	0.997	2.049	>0.999	0.002	0.519
1.00	0.40	0.562	1.338	1.088	1.858	>0.999	0.002	0.790
1.10	0.15	0.523	2.006	0.876	2.549	0.996	0.006	2.165
1.10	0.20	0.249	1.902	1.161	2.564	0.999	0.003	1.478
1.10	0.25	0.446	2.346	0.975	2.383	0.998	0.004	1.667
1.10	0.30	0.399	1.861	1.029	2.252	0.998	0.004	1.734
1.10	0.35	0.396	1.558	1.030	2.222	0.998	0.005	1.902
1.10	0.40	0.134	1.098	1.284	2.318	0.998	0.004	2.659
1.20	0.15	0.156	1.528	1.051	3.097	>0.999	0.001	0.332
1.20	0.20	0.252	1.843	0.974	2.808	0.998	0.004	1.310
1.20	0.25	0.301	2.188	0.916	2.639	0.999	0.002	1.049
1.20	0.30	0.385	1.975	0.839	2.456	0.998	0.004	1.641
1.20	0.35	0.377	1.410	0.843	2.431	0.999	0.003	1.169
1.20	0.40	0.112	1.247	1.100	2.363	0.999	0.003	2.134
1.30	0.15	0.457	2.614	0.575	2.839	0.999	0.001	0.453
1.30	0.20	0.229	2.105	0.814	2.943	>0.999	0.001	0.578
1.30	0.25	0.255	2.022	0.786	2.759	0.999	0.003	1.230
1.30	0.30	0.202	1.823	0.845	2.555	0.999	0.003	1.504
1.30	0.35	0.272	1.688	0.787	2.441	0.996	0.005	2.600
1.30	0.40	0.068	1.367	0.975	2.360	0.998	0.004	3.887
1.45	0.15	0.109	2.851	0.706	3.366	0.997	0.002	0.627
1.45	0.20	0.395	3.506	0.422	2.955	0.998	0.002	0.551
1.45	0.25	0.255	1.726	0.569	3.013	>0.999	0.001	0.261
1.45	0.30	0.304	1.922	0.521	2.754	0.999	0.001	0.670
1.45	0.35	0.274	1.692	0.555	2.751	>0.999	0.001	0.473
1.45	0.40	0.250	1.726	0.580	2.684	0.999	0.001	0.806
1.60	0.15	<0.001	2.880	0.647	3.473	0.995	0.001	0.740
1.60	0.20	0.276	2.931	0.369	3.014	0.998	0.001	0.620
1.60	0.25	0.130	1.616	0.524	3.091	>0.999	0.001	0.369
1.60	0.30	0.090	1.574	0.565	2.941	>0.999	<0.001	0.222
1.60	0.35	0.130	1.612	0.524	2.864	>0.999	<0.001	0.286
1.60	0.40	0.092	1.565	0.564	2.800	1.000	0.001	0.652

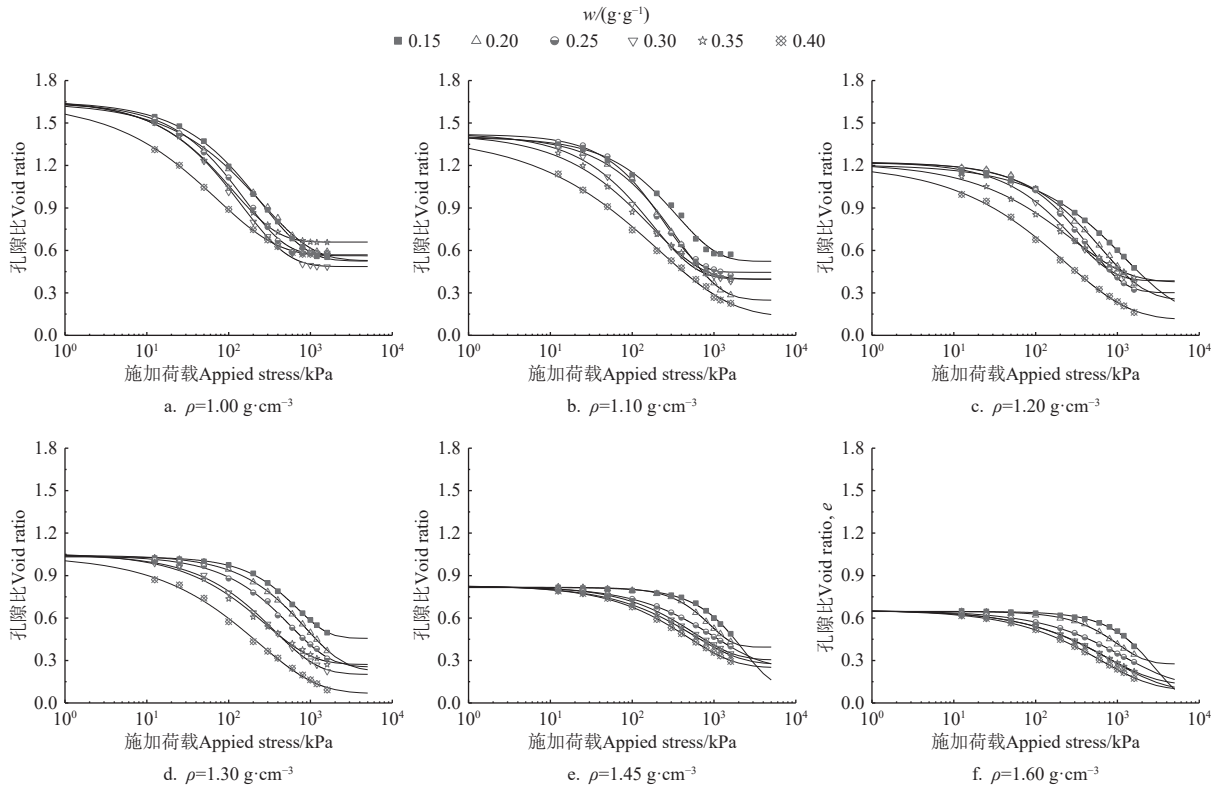
注:  $R^2$  为决定系数;  $S_{RMSE}$  为均方根误差;  $S_{MAPE}$  为平均绝对百分比误差。下同。

Note:  $R^2$  is coefficient of determination;  $S_{RMSE}$  is root mean square error;  $S_{MAPE}$  is mean absolute percentage error. Same below.

由图 2 可以看出, 不同处理土样的压缩曲线形状类似, 荷载处于低压段时孔隙比变化较缓, 此时曲线位于弹性部分, 土样可在外力撤去后自动恢复一部分; 当外力超过某一数值 (即预固结压力) 后孔隙比快速降低, 曲线进入塑

性阶段, 土样发生塑性形变; 荷载到高压段时, 孔隙比变化速率逐渐趋于稳定, 即使继续施加荷载, 土样也很难再变形。初始容重相同时, 随着初始含水量的增大, 压缩曲线由弹性向塑性转变的拐点逐渐前移, 曲线更早进入塑性阶段。





注：图中点为实测值；线为 Gompertz 方程拟合值； $w$  为初始含水量， $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ； $\rho$  为初始容重， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。下同。

Note: In the figure, the point is the measured value; the line is the value fitted by the Gompertz equation;  $w$  is initial moisture,  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $\rho$  is initial bulk density,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Same below.

图2 不同初始容重下初始含水量对黑土压缩曲线的影响

Fig.2 Effects of initial moisture on compression curves of black soil under different initial bulk density

## 2.2 初始含水量和初始容重对预固结压力的影响

不同初始含水量和初始容重处理下的黑土预固结压力如图3所示。随着初始含水量的减小和初始容重的增大，预固结压力显著增大 ( $P<0.05$ )，其变化范围为 10.42~1 106.17 kPa，在高初始含水量 0.40  $\text{g}/\text{g}$ 、低初始容重 1.00  $\text{g}/\text{cm}^3$  时最小，在低初始含水量 0.15  $\text{g}/\text{g}$ 、高初始容重 1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$  时最大。初始含水量大于 0.25  $\text{g}/\text{g}$  或初始容重小于 1.20  $\text{g}/\text{cm}^3$  时，预固结压力均低于 200 kPa。根据方差分析结果 (表2)，初始含水量、初始容重及两者的交互作用对预固结压力影响极显著 ( $P<0.001$ )。

预固结压力的土壤传递函数及其评价指标如表3所示， $\sigma_{pc}$  对初始含水量、容重单因素回归分析使用线性函数拟合效果较好，均达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。式(6)是预固结压力值与初始含水量线性关系的通用方程，不同初始容重下其决定系数为 0.70~0.96，式(7)是预固结压力与初始容重线性关系的通用方程，不同初始含水量下其决定系数为 0.89~0.98。

$$\sigma_{pc} = A_1\rho + B_1w \quad (6)$$

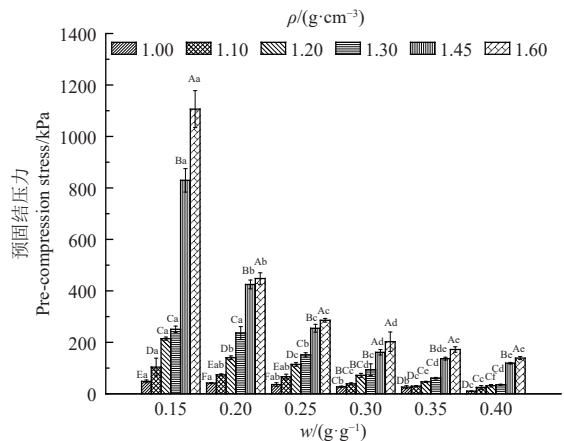
$$\sigma_{pc} = A_2\rho + B_2w \quad (7)$$

式中  $\sigma_{pc}$  为预固结压力，kPa； $w$  为初始含水量， $\text{g}/\text{g}$ ； $\rho$  为初始容重， $\text{g}/\text{cm}^3$ ； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  为拟合系数。

多元回归分析采用逐步回归的方法，引入和剔除变量的标准分别为 0.05 和 0.10 时，得到回归方程式 (8) 拟合效果最好， $F$  检验结果表明方程达到 5% 显著水平 ( $F=65.37$ ,  $F_{0.05(2,34)}=4.12$ )，调整后决定系数为 0.85。

$$\sigma_{pc} = a_1\rho^2 + b_1w^2 + c_1\rho w + d_1 \quad (8)$$

式中  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$  为拟合系数。



注：不同大写字母代表相同初始含水量下不同初始容重间差异显著 ( $P<0.05$ )；不同小写字母代表相同初始容重下不同初始含水量间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: The different capital letters indicate the significance differences among different initial bulk density under the same moisture ( $P<0.05$ ), and the different lowercase represent the significance differences among different initial moisture under the same bulk density ( $P<0.05$ ). Same below.

图3 不同初始含水量和初始容重下黑土预固结压力值

Fig.3 Pre-compression stress of black soil at different initial moisture and bulk density

## 2.3 初始含水量和初始容重对压缩指数的影响

不同处理下黑土压缩指数如图4所示，初始含水量为 0.25  $\text{g}/\text{g}$ 、容重为 1.10  $\text{g}/\text{cm}^3$  时，压缩指数最大；初始

含水量为 0.25 g/g、容重为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 时最小, 其变化范围为 0.311~0.852。同一初始含水量条件下, 压缩指数呈现随初始容重增大而降低的变化趋势, 初始含水量大于 0.20 g/g 时, 初始容重对压缩指数的影响达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。相同初始容重处理时, 压缩指数随含水量增加的变化未表现出明显的规律性, 初始容重为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 时, 压缩指数随着含水量的增加显著减小 ( $P<0.05$ ), 其余初始容重下, 压缩指数随含水量增加而减小的趋势不显著。初始容重为 1.00~1.30 g/cm<sup>3</sup> 时, 各初始含水量水平下压缩指数均大于 0.4。初始容重为 1.45 和 1.60 g/cm<sup>3</sup> 时, 含水量小于 0.25 g/g 时压缩指数均大于 0.4。

表 3 黑土预固结压力与初始含水量和容重的土壤传递函数

Table 3 Soil pedo-transfer functions of pre-compression stress, initial moisture and bulk density of black soil

因素 Factor	处理水平 Treatment level	回归方程 Regression equation	$R^2$	$S_{RMSE}/kPa$	$S_{MAPE}/\%$
$w/(g \cdot g^{-1})$	$\rho=1.00$	$\sigma_{pc}=-141.0w+70.5$	0.96***	2.54	10.24
	$\rho=1.10$	$\sigma_{pc}=-316.8w+143.4$	0.94***	6.67	14.30
	$\rho=1.20$	$\sigma_{pc}=-707.3w+297.6$	0.94***	14.74	17.97
	$\rho=1.30$	$\sigma_{pc}=-949.1w+399.0$	0.96***	16.33	16.32
	$\rho=1.45$	$\sigma_{pc}=-2\,578.3w+1\,030.1$	0.78*	117.90	43.61
	$\rho=1.60$	$\sigma_{pc}=-3\,284.4w+1\,295.5$	0.70*	182.95	52.91
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$w=0.15$	$\sigma_{pc}=1\,862.9\rho-1\,949.7$	0.91**	118.53	70.16
	$w=0.20$	$\sigma_{pc}=767.6\rho-751.2$	0.96***	33.79	22.33
	$w=0.25$	$\sigma_{pc}=446.6\rho-417.9$	0.98***	12.78	9.07
	$w=0.30$	$\sigma_{pc}=308.2\rho-293.7$	0.98***	8.92	15.02
	$w=0.35$	$\sigma_{pc}=263.0\rho-257.5$	0.93**	15.04	27.63
	$w=0.40$	$\sigma_{pc}=230.0\rho-233.3$	0.89**	16.05	48.86
$w, \rho$	$\sigma_{pc}=785.5\rho^2+9\,366.0w^2-5\,093.5\rho w-126.5$		0.85**	83.16	85.12

注:  $\sigma_{pc}$  为预固结压力, kPa; \*,  $P<0.05$ ; \*\*,  $P<0.01$ 。下同。

Note:  $\sigma_{pc}$  is pre-compression stress, kPa; \*,  $P<0.05$ ; \*\*,  $P<0.01$ . Same below.

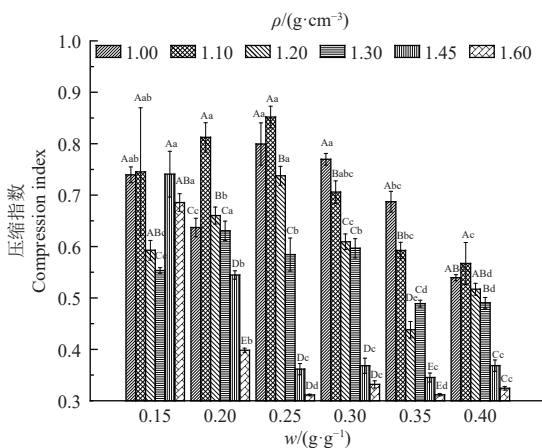


图 4 不同初始含水量和容重黑土压缩指数

Fig.4 Compression index of black soil at different initial moisture and bulk density

构建压缩指数的土壤传递函数时, 压缩指数与初始含水量、容重间单因素回归分析的线性函数和二次多项式函数均未通过显著性检验。用逐步回归法进行多元回归分析, 当引入和剔除变量的标准分别为 0.05 和 0.10 时, 得到黑土压缩指数与初始含水量和容重之间的回归方程式 (9) 呈二元多项式关系。

$$C_c = -0.371\rho - 0.682\rho w + 1.279 \quad (9)$$

式中  $C_c$  为压缩指数;  $w$  为初始含水量, g/g;  $\rho$  为初始容重,

表 2 初始含水量和容重对黑土预固结压力影响的方差分析  
Table 2 Analysis of variance (ANOVA) of initial moisture and bulk density on pre-compression stress of black soil

变异来源 Source of variation	自由度 Degree of freedom	F 值 F value
$w$	5	1 111.36***
$\rho$	5	1 292.72***
$w \times \rho$	25	216.46***

注: \*\*\*,  $P<0.001$ 。下同。

Note: \*\*\*,  $P<0.001$ . Same below.

双因素方差分析结果 (表 4) 表明, 初始含水量和初始容重对压缩指数的影响均达到极显著性差异 ( $P<0.001$ ), 且二者交互作用的影响也达到极显著性水平 ( $P<0.001$ )。

g/cm<sup>3</sup>。该方程达到 5% 显著水平 ( $F=46.93$ ,  $F_{0.05(2,34)}=4.12$ ), 其调整后决定系数  $R^2$  为 0.72, 均方根误差  $S_{RMSE}$  为 0.08, 平均绝对百分比误差  $S_{MAPE}$  为 11.90%, 模型拟合精度较高 ( $S_{MAPE}<20\%$ )。对各项偏回归系数进行检验,  $\rho$  和  $\rho w$  的偏回归系数均达到 5% 显著水平, 相应的标准化回归系数分别为 -0.53 和 -0.48。

表 4 初始含水量和容重对黑土压缩指数影响的方差分析  
Table 4 Analysis of variance (ANOVA) of initial moisture and bulk density on compression index of black soil

变异来源 Source of variation	自由度 Degree of freedom	F 值 F value
$w$	5	64.87**
$\rho$	5	155.97**
$w \times \rho$	25	13.82**

## 2.4 初始含水量和初始容重对回弹指数的影响

如图 5 所示, 回弹指数表现出随初始含水量增加而增大、随初始容重降低而减小的变化趋势, 范围为 0.007~0.321, 在低初始含水量 0.15 g/g、高初始容重 1.60 g/cm<sup>3</sup> 时最小, 在高初始含水量 0.40 g/g、低初始容重 1.00 g/cm<sup>3</sup> 时最大。

表 5 为土壤初始含水量和初始容重对回弹指数的方差分析结果, 初始含水量、初始容重及二者间的交互作用对黑土回弹指数的影响均达到极显著性水平 ( $P<0.001$ )。

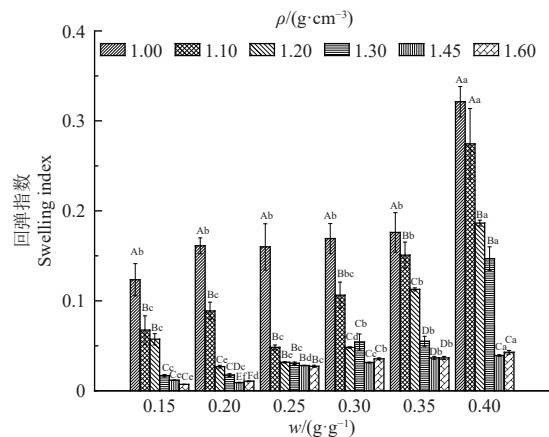


图 5 不同初始含水量和容重黑土回弹指数  
Fig.5 Changes of swelling index of black soil at different initial moisture and bulk density

表 6 是回弹指数的土壤传递函数，单因素回归分析使用线性函数进行拟合，12 种处理中，除  $\rho=1.00\text{ g/cm}^3$ 、 $\rho=1.20\text{ g/cm}^3$  和  $w=0.25\text{ g/g}$ ，其余处理下拟合方程达到显著性水平 ( $P<0.05$ )， $C_s$  与初始含水量的线性关系通用方程如式 (10)，决定系数为 0.64~0.93， $C_s$  与初始容重的线性关系通用方程如式 (11)，决定系数在 0.48~

0.94 之间。

$$C_s = A_3w + B_3 \tag{10}$$

$$C_s = A_4\rho + B_4 \tag{11}$$

式中  $C_s$  为回弹指数； $w$  为初始含水量， $\text{g/g}$ ； $\rho$  为初始容重， $\text{g/cm}^3$ ； $A_3$ 、 $A_4$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  为拟合系数。

表 5 初始含水量和容重对黑土回弹指数影响的方差分析  
Table 5 Analysis of variance (ANOVA) of soil initial moisture and bulk density on swelling index of black soil

变异来源	自由度	F 值
Source of variation	Degree of freedom	F value
w	5	97.71**
ρ	5	178.88**
w×ρ	25	8.39**

多元回归分析得到式 (12)，引入和剔除变量的标准分别为 0.05 和 0.10。F 检验结果表明方程达到 5% 显著水平 ( $F=76.77$ ， $F_{0.05(2,34)}=4.12$ )。该方程的调整后决定系数为 0.90。对各项偏回归系数进行检验， $\rho$ 、 $\rho^2$ 、 $w^2$  和  $\rho w$  的偏回归系数均达到 5% 显著水平，相对应的标准化回归系数分别为−4.31、4.36、1.91 和−1.60。

$$C_s = a_2\rho + b_2\rho^2 + c_2w^2 + d_2\rho w + q \tag{12}$$

式中  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$ 、 $q$  拟合系数。

表 6 黑土回弹指数与初始含水量和容重的土壤传递函数  
Table 6 Soil pedo-transfer functions of swelling index, initial moisture and bulk density of black soil

因素 Factor	处理水平 Treatment level	回归方程 Regression equation	$R^2$	$S_{RMSE}$	$S_{MAPE}/\%$
$w/(\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\rho=1.00$	$C_s=0.60w+0.02$	0.65	0.04	16.27
	$\rho=1.10$	$C_s=0.73w-0.08$	0.69*	0.04	44.36
	$\rho=1.20$	$C_s=0.53w-0.07$	0.64	0.03	56.84
	$\rho=1.30$	$C_s=0.45w-0.07$	0.74*	0.02	45.36
	$\rho=1.45$	$C_s=0.13w-0.01$	0.88**	<0.01	21.63
	$\rho=1.60$	$C_s=0.15w-0.01$	0.93**	<0.01	15.15
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w=0.15$	$C_s=-0.18\rho+0.28$	0.81*	0.02	82.82
	$w=0.20$	$C_s=-0.23\rho+0.34$	0.69*	0.03	114.58
	$w=0.25$	$C_s=-0.16\rho+0.26$	0.48	0.04	65.28
	$w=0.30$	$C_s=-0.20\rho+0.33$	0.70*	0.03	40.09
	$w=0.35$	$C_s=-0.26\rho+0.42$	0.88**	0.02	29.98
	$w=0.40$	$C_s=-0.51\rho+0.81$	0.94***	0.03	37.01
$w, \rho$	$C_s=-1.60\rho+0.62\rho^2+3.05w^2-0.98\rho w+1.18$		0.90**	0.02	47.96

注：C<sub>s</sub> 回弹指数。  
Note: C<sub>s</sub> is swelling index.

3 讨 论

本研究中测定的土壤预固结压力与初始含水量线性负相关，与初始容重线性正相关，与大多数研究结论一致[8,12,18,22,35]。研究认为[13]，预固结压力与初始容重的线性正相关关系可以用颗粒间摩擦力增加解释，这会阻碍土壤颗粒的分离和移动，从而增加土壤承载能力。而预固结压力与初始含水量呈线性负相关，是由于土壤孔隙内水分增加或者包裹在土壤颗粒表面的结合水膜增厚，土壤颗粒间的内摩擦力和水膜弯月面力减小，降低了有效应力和接触点数量，导致不同初始含水量处理下预固结压力值的差异[38]。KELLER 等[39]采用完整原状土样进行压缩试验，但是由于土样质地、结构和含水量的变异性，研究结果中存在矛盾。SAFFIH-HDADI 等[19,21]采用重塑土进行压缩试验，以降低样品变异性对压缩特性参

数的影响。考虑到田间原状土样的采集受到应力释放和人工开挖扰动的影响，即使尽可能保持其天然孔隙比不变，仍会引起试样中有效应力的降低[40]，而重塑土接近理想、初始的土壤受力状态，可在一定程度上反映农田土壤的压缩特性，因此本研究用重塑土进行试验。预固结压力与初始含水量和初始容重之间的相关系数高于许多其他文献中报道的观测值，这可能是由于重塑黑土排除了田间土壤条件对预固结压力的影响，降低了结构异质性的干扰[41]。此外，单轴压缩试验中并未控制试样的失水条件，每级荷载加压 1 h 及稳定过程中试样含水量均可能发生变化，也会对预固结压力测定值产生影响。丁肇等[42]认为当土壤内的垂直应力大于承载力极限即预固结压力时，土壤发生压缩破坏，通过压力传感器测定农业拖拉机轮胎压实后土壤 15 cm 深度平均最大垂直应



力, 为 228 kPa。本文研究结果表明, 初始含水量大于 0.25 g/g (70% 田间持水量) 或初始容重小于 1.20 g/cm<sup>3</sup> 时, 预固结压力均小于 200 kPa, 压实风险较大, 需避免或减少农机作业。

一般认为, 土壤的压缩指数  $C_c < 0.2$  时为低压缩性土,  $0.2 \leq C_c \leq 0.4$  为中压缩性土,  $C_c > 0.4$  时为高压缩性土<sup>[40]</sup>。本文研究的重塑黑土压缩指数在 0.311~0.852 范围内, 与 AN 等<sup>[21]</sup> 测定黑土压缩指数范围 0.293~0.950 相近, 可以认为黑土是高压缩性土。本文发现初始含水量相同时, 随着容重的增大, 压缩指数降低, 这可能因为容重较高的土壤颗粒排列更紧密, 颗粒间摩擦力更高, 变形更加困难<sup>[43]</sup>。根据本文研究结果, 压缩指数与初始含水量和初始容重之间的关系为二元多项式方程。相同初始容重处理下, 压缩指数与初始含水量之间规律不明显, 初始容重为 1.00 和 1.10 g/cm<sup>3</sup> 水平时, 含水量为 0.15、0.20 和 0.25 g/g 的处理未对压缩指数造成显著减小, 但显著高于其他 3 个处理水平; 初始容重为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 时, 压缩指数随着含水量的增加显著减小 ( $P < 0.05$ )。压缩指数与初始含水量的关系尚无定论, LARSON 等<sup>[44]</sup> 的研究发现压缩指数与含水量之间没有明显相关性, AN 等<sup>[21]</sup> 试验结果表明, 压缩指数在黑土上与含水量正相关, 在棕壤土中没有明显相关性, de LIMA 等<sup>[23]</sup> 发现土壤压缩指数随着初始基质势的增加而降低, 且在中等土壤湿度 (土壤水吸力值为 2.5) 时最易压实。KELLER 等<sup>[20]</sup> 认为部分原因在于压缩指数表示荷载超过预固结压力后土壤体积变形的速率, 因此存在临界含水率, 此时压缩指数最大。由于加载过程中土体饱和度和基质势会发生变化, 对压缩特性的影响较为复杂。研究土壤压缩指数与含水量之间的关系时, 需要进一步考虑土壤初始基质势和饱和度的影响。

由于回弹指数不是塑性变形指标, 在压缩特性相关研究中受到的关注较少, 如 AN 等<sup>[21]</sup> 对比初始含水量和初始容重对黑土和棕壤土压缩特性的影响时, 只讨论了预固结压力和压缩指数, 并未涉及回弹指数。本文研究发现黑土回弹指数随初始含水量增加而增大、随初始容重增大而减小, 这与大多数研究结论一致<sup>[8,18,20,23,34]</sup>。KELLER 等<sup>[16]</sup> 测定瑞典 4 个农场的回弹指数为 0.002~0.025, 霍连飞等<sup>[8]</sup> 发现水稻土的回弹指数为 0.003~0.138, de LIMA 等<sup>[23]</sup> 发现巴西两种氧化土回弹指数范围为 0.010~0.020, 韩少杰等<sup>[35]</sup> 测定的黑土回弹指数变化范围为 0.041~0.070, 这些结果均小于本文所测黑土的回弹指数 (0.007~0.321)。不同研究中回弹指数差异较大, 可能与初始基质吸力、黏粒含量和有机碳含量有关。de LIMA 等<sup>[23]</sup> 发现回弹指数对初始基质势有显著的依赖性, 在中等土壤水吸力水平处存在峰值, 但是受初始基质势的影响程度小于压缩指数。de LIMA 还认为 2 种氧化土黏粒含量较低, 因此回弹指数偏小, 但是林琳等<sup>[34]</sup> 的研究中, 黑土的回弹能力随最终黏粒含量的增加而逐渐减弱。BRAIDA 等<sup>[45]</sup> 对巴西非膨胀土和 PEREIRA 等<sup>[46]</sup> 对法国始成土的研究中, 回弹指数随着有机碳含量的增加而增大。这种影响或与土壤持水性随黏粒含量和有机

碳含量的变化相关。

重塑土压缩特性的土壤传递函数研究对进一步应用压实模型、评估实际压实风险有较好的参考价值。土壤压实模型可为田间管理提供压实风险预警, 例如应用最为广泛的近似分析模型 (SoilFlex 模型、Terranimo 模型等) 简化了模拟农田作业压实的计算步骤, 可同时预测土壤应力传播和体积密度变化, 土壤压缩特性是确定模型上边界条件的重要输入参数。由于原状土的采样受到应力释放和人为扰动的影响, 其压缩特性的测定需要对常规室内压缩曲线加以修正后才能求得<sup>[40]</sup>, 增加了土壤压实模型应用的复杂性和模拟结果的不确定性。通过重塑土建立压缩特性与主要影响因素 (含水量、容重等) 之间的传递函数, 可为基于土壤压实过程模拟的压实风险评估和预警模型提供具有参考意义的关键输入参数, 从而简化模型应用过程、提高压实模型的实用性。

## 4 结 论

为了探究初始含水量和初始容重对黑土压缩特性的影响及其变化规律, 本文基于重塑黑土单轴压缩试验数据拟合压缩曲线, 比较了不同初始含水量和初始容重条件下黑土的压缩特性, 得到结论如下:

1) 基于单轴压缩试验数据, 利用 Gompertz 方程拟合不同初始含水量和容重处理下重塑黑土的压缩曲线, 拟合效果较好, 决定系数  $R^2$  大于 0.995。初始含水量、初始容重及二者间的交互作用对重塑黑土压缩特性 (预固结压力、压缩指数和回弹指数) 的影响均达到极显著性水平 ( $P < 0.001$ )。

2) 预固结压力与含水量显著线性负相关、与容重显著线性正相关 ( $P < 0.05$ ); 压缩指数与初始含水量和初始容重的关系呈二元多项式方程, 随容重的增大而降低, 在中等土壤含水量时最大; 回弹指数与含水量正相关、与容重负相关。预固结压力越大, 压缩指数越小, 土壤发生压实板结的风险越低, 本研究显示初始含水量大于 70% 田间持水量或初始容重低于 1.20 g/cm<sup>3</sup> 时, 黑土的预固结压力小于 200 kPa 且压缩指数大于 0.4, 土壤的压实风险较高, 农机应避免在此条件下进地作业。

3) 通过回归分析建立了重塑黑土压缩特性与初始含水量和容重之间的土壤传递函数, 估算预固结压力、压缩指数和回弹指数的精度较高, 可为黑土压缩特性预测和适耕性判断提供参考依据。这些传递函数还可作为土壤压实过程模型的输入参数, 用于评估农机具田间作业的压实风险和预测预警。在后续研究中, 将进一步开展原状土的压缩特性研究, 以验证并优化土壤传递函数对田间土壤的预测效果。

## [参 考 文 献]

- [1] GÜRSOY S. Soil compaction due to increased machinery intensity in agricultural production: Its main causes, effects and management [M]//AHMAD F, SULTAN M. Technology in Agriculture. London: IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.98564.

- [2] Soil Science Society of America. Glossary of soil science terms[R]. Madison, Wisconsin (WI):SSSA, 2008.
- [3] 李汝莘, 史岩, 迟淑筠, 等. 机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗[J]. 农业机械学报, 1999, 30(2): 13-17. LI Ruxin, SHI Yan, CHI Shuyun, et al. Soil compaction and tillage energy consumption caused by tires of agricultural machines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [4] MILEUSNIĆ Z I, SALJNIKOV E, RADOJEVIĆ R L, et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact[J]. *Journal of Terramechanics*, 2022, 100: 51-60.
- [5] 付娟, 马仁明, 贾燕锋, 等. 机械压实对农田土壤性质及土壤侵蚀的影响研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊 1): 27-36. FU Juan, MA Renming, JIA Yanfeng, et al. Research progress in the effects of mechanical compaction on soil properties and soil erosion in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(suppl 1): 27-36. (in Chinese with English abstract)
- [6] 祝飞华, 王益权, 胡卫光, 等. 关中农田土壤剖面的主要物理性状研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 145-150. ZHU Feihua, WANG Yiquan, HU Weiguang, et al. Physical properties in soil profile of farmlands in Central Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李勇, 赵云泽, 勾宇轩, 等. 黄淮海旱作区土壤压实度空间分布特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 83-91. LI Yong, ZHAO Yunze, GOU Yuxuan, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of degree of compaction in dry-farming Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(13): 83-91. (in Chinese with English abstract)
- [8] 霍连飞, BELAL E A, 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. HUO Lianfei, BELAL E A, DING Qishuo, et al. Compression characteristics of paddy soil based on Gompertz function[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(12): 136-142. (in Chinese with English abstract)
- [9] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164. JIN Huifang, SHI Dongmei, CHEN Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(7): 155-164. (in Chinese with English abstract)
- [10] 乔金友, 张丹, 张宏彬, 等. 大中小型拖拉机压实对土壤坚实度和大豆产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 26-33. QIAO Jinyou, ZHANG Dan, ZHANG Hongbin, et al. Effects of soil compaction by various tractors on soil penetration resistance and soybean yields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(21): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- [11] 任利东, 王丽, 林琳, 等. 农田土壤机械压实研究进展与展望 [J/OL]. 土壤学报, [2023-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221101.1126.002.html>. REN Lidong, WANG Li, LIN Lin, et al. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: A review[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, [2023-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221101.1126.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- [12] LEBERT M, HORN R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 1991, 19(2): 275-286.
- [13] HORN R, LEBERT M. Chapter 3-Soil compactability and compressibility [M/OL]// SOANE B D, van OUWERKERK C: *Developments in Agricultural Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 1994: 45-69[2022-11-28]. DOI: 10.1016/B978-0-444-88286-8.50011-8.
- [14] 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.
- [15] KELLER T, ARVIDSSON J. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(6): 1373-1381.
- [16] KELLER T, LAMANDÉ M, SCHJØNNING P, et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests[J]. *Geoderma*, 2011, 163(1/2): 13-23.
- [17] KELLER T, ARVIDSSON J, SCHJØNNING P, et al. In situ subsoil stress-strain behaviour in relation to soil precompression stress[J]. *Soil Science*, 2012, 177(8): 490-497.
- [18] IMHOFF S, SILVA A P D, FALLOW D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of hapludox[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 17-24.
- [19] SAFFI-HDADI K, DÉFOSSEZ P, RICHARD G, et al. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(1): 96-103.
- [20] KELLER T, LAMANDÉ M, NADERI-BOLDAJI M, et al. Soil compaction due to agricultural field traffic: An overview of current knowledge and techniques for compaction quantification and mapping [M]// *Advances in Understanding Soil Degradation*. Berlin: Springer, 2021: 287-312. DOI: 10.1007/978-3-030-85682-3\_13.
- [21] AN J, ZHANG Y, 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中



- 国统计出版社, 2021.
- [25] 王建, 黄腾, 孙晓宇. 产粮第一大省黑龙江夯实丰收之基[N/OL]. 瞭望, (2023-01-10)[2023-03-05]. [http://lw.news.cn/\(2023-01-10\)/c\\_1310689011.htm](http://lw.news.cn/(2023-01-10)/c_1310689011.htm).
- [26] 张兴义, 隋跃宇, 孟凯. 农田黑土机械压实及其对作物产量的影响[J]. 农机化研究, 2002(4): 64-67.  
ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, MENG Kai. The press-hard of field black-soil and it's influence on the yield of grain[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2002(4): 64-67. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[R/OL]. (2021-07-09)[2022-11-17]. <https://www.cas.cn/yw/202107/W020210714418584895253.pdf>.
- [28] 宋运红, 杨凤超, 刘凯, 等. 黑龙江省海伦地区黑土剖面常量元素地球化学特征及其对物源的指示意义[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1105-1113.  
SONG Yunhong, YANG Fengchao, LIU Kai, et al. Geochemical characteristics of major elements in the black soil profiles of the Hailun area, Heilongjiang Province and their implications for provenance[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(5): 1105-1113. (in Chinese with English abstract)
- [29] 韩晓萌, 戴慧敏, 刘凯. 松嫩平原北部典型黑土剖面黏土矿物组成及其环境指示意义[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1056-1063.  
HAN Xiaomeng, DAI Huiming, LIU Kai. The clay mineral composition and environmental implications of the typical black soil profiles of the northern Songnen Plain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(5): 1056-1063. (in Chinese with English abstract)
- [30] 中华人民共和国国家标准编写组. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 1-684.
- [31] 邹文秀, 韩晓增, 江恒, 等. 黑龙江海伦黑土区湿润期和干旱期土壤水分变化特征[J]. 土壤与作物, 2012, 1(2): 110-116.  
ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, JIANG Heng, et al. The dynamical change of soil water during dry and wet period in black soil zone in Hailun, Heilongjiang province[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(2): 110-116. (in Chinese with English abstract)
- [32] 邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 9-18.  
ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, YAN Jun, et al. Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(15): 9-18. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张红霞, 彭新华, 郭自春, 等. 土壤含水量和容重对砂姜黑土抗剪强度的影响及其传递函数构建[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 524-531.  
ZHANG Hongxia, PENG Xinhua, GUO Zichun, et al. Influence of soil water content and bulk density on shear strength of shajiang black soil and its pedo-transfer function construction[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 524-531. (in Chinese with English abstract)
- [34] 林琳, 韩少杰, 王恩姮, 等. 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.  
LIN Lin, HAN Shaojie, WANG Enheng, et al. Effect of organic matter and clay content on compression-rebound characteristics of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1138-1147. (in Chinese with English abstract)
- [35] 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.  
HAN Shaojie, WANG Enheng, CHEN Xiangwei, et al. Effects of tillage on compression and rebound behaviour of topsoil in black soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 646-653. (in Chinese with English abstract)
- [36] 金玉贺, 肖质秋, 安晶, 等. 不同土壤水吸力与耕作方式对土壤压缩—回弹特性的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 66-73.  
JIN Yuhe, XIAO Zhiqiu, AN Jing, et al. Effects of soil water suction and tillage method on soil compressibility-resilience characteristics[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 66-73. (in Chinese with English abstract)
- [37] EZZAHRA Y F, BOUMANCHAR I, SRHIR B, et al. Waste-to-energy as a tool of circular economy: Prediction of higher heating value of biomass by artificial neural network (ANN) and multivariate linear regression (MLR)[J]. *Waste Management*, 2022, 153: 293-303.
- [38] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1963, 13(3): 177-197.
- [39] KELLER T, ARVIDSSON J, DAWIDOWSKI J B, et al. Soil precompression stress: II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(1): 97-108.
- [40] 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 1-245.
- [41] PENG X H, HORN R, ZHANG B, et al. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 76(2): 125-137.
- [42] 丁肇, 李耀明, 唐忠, 等. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 10-18.  
DING Zhao, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Compaction effects of wheeled vehicles and tracked on farmland soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(5): 10-18. (in Chinese with English abstract)
- [43] PAZ A, GUÉRIF J. Influence of initial packing density, water content and load applied during compaction on tensile strength of dry soil structural units[M]//Advances in Geocology. La Coruna: Catena Verlag, 2000: 22-31.
- [44] LARSON W E, GUPTA S C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(6): 1127-1132.
- [45] BRAIDA J A, REICHERT J M, REINERT D J, et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2008, 32(2): 477-485.
- [46] PEREIRA J O, DÉFOSSEZ P, RICHARD G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 34-44.

## Effects of initial moisture and bulk density on the soil compression characteristics of black soil

GAO Chen<sup>1,2</sup>, LI Xiaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Hongxia<sup>1</sup>, JIANG Yifei<sup>1,2</sup>, XIE Yue<sup>3</sup>, LIU Jianli<sup>1,4</sup>✉

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

**Abstract:** Soil structure can deteriorate under agricultural field vehicle compaction. Physical soil quality has posed a serious threat to agriculture production in Northeast China's farmland. Typically, the widespread and heavy use of agricultural machinery can be responsible for this instance. Soil compression characteristics can greatly contribute to the quantitative analysis of the soil compaction process. But it is still unclear on the variation of black soil compression characteristics with different initial moisture and initial bulk density. This study aims to investigate the influence of initial moisture and initial bulk density on the repacked black soil. The soil compaction risk was also quantified and predicted after evaluation. Six initial moisture levels were set at 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, and 0.40 g/g, and six initial bulk density levels were at 1.00, 1.10, 1.20, 1.30, 1.45, and 1.60 g/cm<sup>3</sup>. Uniaxial confined compression tests were conducted using a consolidator to measure the soil's ratio under different applied stress. Soil compression curves were collected using the Gompertz equation. Three important characteristics of soil compression were calculated from curves, such as the pre-compression stress, the compression index, and the swelling index. The results showed that the initial moisture, bulk density, and their interaction all shared a significant influence on the compression characteristics of repacked black soil ( $P < 0.001$ ). A series of soil pedo-transfer functions were established to predict the compression characteristics. The  $\sigma_{pc}$  of black soil ranged from 10.42 to 1106.17 kPa, which was positively correlated with the initial moisture content, and negatively correlated with the initial bulk density in a linear relationship ( $P < 0.05$ ). The compression index ranged from 0.311 to 0.852, indicating a bivariate polynomial equation relationship with the initial moisture and bulk density. There was a decrease as the initial bulk density increased and reached the maximum at medium moisture. The swelling index ranged from 0.007 to 0.321, which was positively correlated with the initial water content, and negatively correlated with the initial bulk density. Therefore, the black soil presented pre-compression stress lower than 200 kPa and high compression stress greater than 0.4, when the initial moisture exceeded 70% of the field capacity or the initial bulk density was lower than 1.2 g/cm<sup>3</sup>. Such soil hydraulic and structure conditions indicated a high risk of soil compaction under field traffic. It was recommended to fully consider the risk for the cultivation operations without delaying farming. In summary, soil compaction has been caused by agricultural field traffic, although agricultural mechanization has been beneficial for the production in the black soil region. This finding can provide a strong reference to understanding the effects of the initial moisture and bulk density on compressive characteristics. A set of pedo-transfer functions was built using the initial soil moisture and initial bulk density. An effective prediction was offered for the black soil pre-compression stress, compression index, and swelling index. These predictive pedo-transfer functions presented the potential to quantify and predict the level of soil compaction risk induced by heavy machines during wheeling and field operations. The implementation of pedo-transfer functions can also provide crucial data for the input parameters of soil compaction models. Therefore, an impactful basis can be obtained for the soil workability assessment and field operating conditions.

**Keywords:** soils; models; moisture; transfer function; bulk density; compression characteristics