doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.016

土壤表层含水率与镇压力作用下探针贯入阻力变化规律

王志楠[1,2]　卢彩云[1,2]　何　进[1,2]　王庆杰[1,2]　贺　栋[1,2]　王泉玉[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对多数研究需单独测量单个土壤参数、对贯入阻力(PR)响应多参数研究较少等问题,本文以粘壤土为研究对象,开展土壤含水率和镇压力对探针贯入阻力的影响研究。设置 6 个含水率和 3 个镇压力,记录各条件下探针贯入土壤过程中的阻力变化曲线。以探针贯入曲线终峰值(FP)、相对波动带宽(RFBW)和探针贯入阻力曲线傅里叶能量(PRFE)为指标进行全因素试验。结果表明:对于上升效应,当土壤含水率从 0 增至 10% 时,随着含水率增加,终峰值不断提高,含水率 10% 时达到最大值 2.492 N(较 0 增加 230.94%);镇压力在低含水率时对终峰值影响较大,高含水率时影响减弱。对于波动特性,当含水率为 0 ~ 15% 时,相对波动带宽和探针贯入阻力曲线傅里叶能量均随含水率增加而下降,含水率 15% 时相对波动带宽降幅为含水率 0 时的 68.05%,探针贯入阻力曲线傅里叶能量降至含水率 0 时的 85.80%;随着镇压力增加,相对波动带宽与探针贯入阻力曲线傅里叶能量均下降,镇压力 75 kPa 时相对波动带宽降至镇压力 15 kPa 时的 74.62%,探针贯入阻力曲线傅里叶能量降为镇压力 15 kPa 时的 87.37%。研究结果揭示了土壤含水率和镇压力对探针贯入阻力的影响规律,为研发土壤性质测试装置提供了基础。

关键词: 贯入阻力; 土壤含水率; 土壤镇压力; 土壤紧实度; 探针
中图分类号: S152.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0167-10　　**OSID**:

Variation of Probe Penetration Resistance under Soil Surface Moisture Content and Compaction Pressure

WANG Zhinan[1,2]　LU Caiyun[1,2]　HE Jin[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　HE Dong[1,2]　WANG Quanyu[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problems that most studies required the individual measurement of single soil parameters and there were few studies on the response of multiple parameters to the penetration resistance (PR), taking the clay loam as the research object and a study on the influence of soil moisture content and compaction pressure on the PR was conducted. Six moisture contents and three compaction pressures were set, and the resistance change curves during the process of the probe penetrating the soil under various conditions were recorded. A full-factor experiment was carried out with the final peak (FP) of the probe penetration curve, the relative fluctuation bandwidth (RFBW), and the Fourier energy of the probe penetration resistance curve (PRFE) as the indicators. The results showed that for the ascending effect, when the soil moisture content was increased from 0 to 10%, with the increase of the moisture content, FP was continuously increased, and reached the maximum value of 2.492 N at a moisture content of 10% (an increase of 230.94% compared with 0); the compaction pressure had a greater impact on FP at low moisture content, and the impact weakened at high moisture content. For the fluctuation characteristics, when the moisture content was between 0 and 15%, both RFBW and PRFE were decreased with the increase of the moisture content. At a moisture content of 15%, the decrease rate of RFBW was 68.05% of that at a moisture content of 0, and PRFE dropped to 85.80% of that at a

收稿日期: 2025-05-06　修回日期: 2025-05-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(32401710)、国家重点研发计划项目(2023YFD1500401)、兴安盟本级科技合作项目和中国农业大学 2115 人才工程项目
作者简介: 王志楠(1998—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: zhinan.wang@cau.edu.cn
通信作者: 卢彩云(1986—),女,副教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与智能农业装备研究,E-mail: lucaiyun@cau.edu.cn

moisture content of 0; with the increase of the compaction pressure, both RFBW and PRFE were decreased. When the compaction pressure was 75 kPa, the RFBW dropped to 74.62% of that when the compaction pressure was 15 kPa, and PRFE dropped to 87.37% of that when the compaction pressure was 15 kPa. The research results revealed the influence law of soil moisture content and compaction pressure on the probe PR, providing a basis for the development of soil property testing devices.

Key words: penetration resistance; soil moisture content; soil compaction pressure; soil compactness; probe

0 引言

农田土壤物理性质的精准检测是发展智慧农业的必要环节[1-3]。锥入度测定仪常用于估计钢锥贯入土壤的压力[4],通过测得的贯入阻力描述土壤机械阻抗或穿透能力,是土壤物理性质检测的主要仪器,已被广泛应用于土壤压实、种子出苗等研究[5-7]。

贯入阻力与土壤含水率、紧实度等土壤特性有关,构建不同土壤特性下的贯入阻力变化规律,是土壤压实程度、土壤中作物根系生长阻力等检测技术研究的重要依据。廖茂权等[8]建立了含水率与贯入阻力的关系模型,提高了粉质壤土压实程度的测定效率和准确性;闫雷等[9]通过研究土壤紧实度、玉米根系垂直分布深度与贯入阻力的相关关系,明确了不同耕作方式下玉米根系垂直分布情况;于永堂等[10]建立了贯入阻力与土壤干密度关系模型,提高了土壤紧实度检测精度。

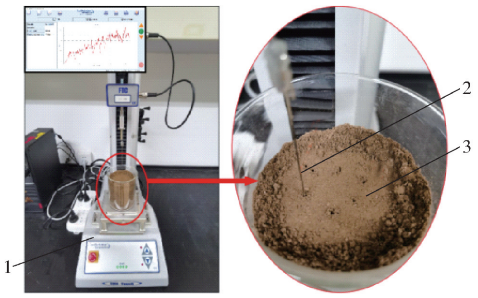
现有贯入阻力变化规律研究主要通过离散数据开展单一因素分析,如通过间隔 2.5 ~ 5 cm 采样方式测试下压力控制精度,分析土壤质地、含水率等参数对贯入阻力的影响[11-12],但土壤垂直异质性导致有限采样点的结论存在不确定性[13]。有研究表明连续采集数据可提升数据可靠性,如划分曲线区段平均化[14]或高频采集数据以证实镇压力与贯入阻力的相关性[15],但简单处理仍难以构建多参数响应关系,且需独立检测含水率和紧实度作为基础条件,流程较繁琐。

计算方法为数据特征挖掘提供了新思路,如傅里叶变换可提取频域能量特征[16-17],最小二乘拟合能够捕捉趋势变化[18]。本文设置 6 个含水率和 3 个镇压力,采集探针贯入深度 0 ~ 60 mm 土壤贯入阻力曲线,利用傅里叶变换等算法,以终峰值(FP)、相对波动带宽(RFBW)和探针贯入阻力曲线傅里叶能量(PRFE)3 个指标进行全因素试验,以期揭示不同土壤含水率和镇压力对探针贯入阻力的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验仪器与测试过程

利用 TMS - Touch 型质构仪采集数据,配套称量传感器测量分辨率为 1∶6 500,在设置镇压力时使用传感器量程为 1 000 N,采集探针贯入阻力时使用传感器量程为 100 N。试验时,将探针安装在质构仪传感器上,垂直置于盛有测试土壤的烧杯上方(图 1a)。质构仪运行速度为 1 ~ 1 000 mm/min(可调),最大行程 320 mm。探针总长 75.45 mm,钢制,直径 0.91 mm(图 1b)。为使测试覆盖表层土壤深度,设定探针总行程为 60 mm。测试时,探针以垂直速度 200 mm/min 插入测试土壤,质构仪以采样频率 100 Hz 连续采集探针贯入阻力。



(a) 试验装置及数据采集界面 (b) 探针

图 1 试验装置

Fig. 1 Testing apparatus

1. 质构仪 2. 探针 3. 测试土壤

1.2 试验因素与设计

测试土壤质地为粘壤土,采自山西省长治市(35°49′ ~ 37°07′N,111°59′ ~ 113°44′ E)。采用比重法测定土壤质地[19],各粒级质量分数如表 1 所示。

表 1 土壤样品质地检测结果

Tab. 1 Soil sample texture test results

粒径/mm	0 ~ 0.002	0.002 ~ 0.02	0.02 ~ 0.2	0.2 ~ 2.0
质量分数/%	20.50	44.60	30.50	3.65

1.2.1 土壤含水率

在实验室相同温湿度条件下进行试验,设置土壤含水率为 0、5%、10%、15%、20%、25%。为制备上述土壤,将土壤过 2 mm 筛去除杂物后,置于干燥箱中干燥至质量恒定。称取 800 g 干土,按设定含水率制备湿土:用喷雾瓶将静置 24 h 的纯水缓慢喷洒于干土表面,湿润表层后充分搅拌以确保水分均匀,重复此过程直至达到目标含水率。

1.2.2　土壤镇压力

设置镇压力为 15、45、75 kPa。利用配备 P/75 探头的质构仪制备目标镇压力的土壤，探头与土壤接触面积为 4.42×10^{-3} m^2，根据压力公式计算得对应施加力分别为 66.23、198.70、331.18 N。制备时，土壤样品自然落入烧杯并整平表面，探头以速度 200 mm/min 施压，达到预定镇压力后停止下降，完成镇压，随后升起探头，得到镇压后的土壤样品。

1.3　试验指标

如图 2 所示，为避免探针开始运动前与土壤接触导致无法采集贯入瞬间的阻力，在探针与土壤间设置 1.5 mm 的间隙，该行程段数据（*AB* 段）无效，需在分析前删除；行程终点处，由于探针无法立即停止，质构仪会采集到少量超过行程距离的数据（*CD* 段），同样无效，需删除。由图 2 可见，探针贯入土壤过程中所受阻力呈波动上升趋势。为深入分析阻力曲线，基于该曲线提取指标：①随深度增加的曲线变化（终峰值 FP），反映上升效应。②曲线波动特征（相对波动带宽 RFBW 和探针贯入阻力曲线傅里叶能量 PRFE），反映波动情况。

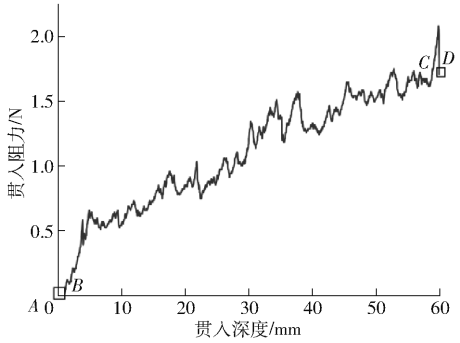


图 2　原始数据预处理示意图（土壤含水率 5%，镇压力 45 kPa）

Fig. 2　Schematic of raw data preprocessing (soil moisture content of 5%, compaction pressure of 45 kPa)

1.3.1　终峰值

终峰值（FP）是指曲线上升趋势中探针到达深度 60 mm 时对应的阻力。由于数据波动，无法直接从原始数据曲线获取上升效应中的峰值，采用最小二乘法求解探针贯入阻力的拟合线，取深度 60 mm 处的拟合线预测值作为终峰值，求解如图 3 所示。

1.3.2　相对波动带宽

相对波动带宽（RFBW）为原始数据曲线波动带宽（FBW）与终峰值（FP）的比值，用于评估探针贯入阻力曲线的波动幅度。由于数据曲线包含上升和波动部分，分析波动前需去除曲线上升趋势，因此相对波动带宽的计算分为去除曲线趋势、计算 FBW、求解相对波动带宽 3 个步骤。

（1）去除曲线趋势。图 3 拟合线为探针贯入阻力曲线的趋势线 $p_{trend}(d)$，用含趋势的探针贯入阻力 F 减去拟合趋势线 $p_{trend}(d)$，得到去趋势的贯入阻力曲线 $F_{detrend}(d)$。

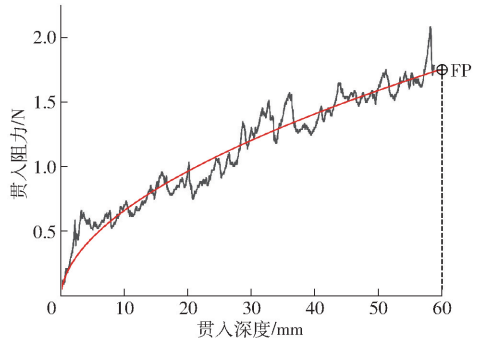


图 3　贯入阻力求解示意图（土壤含水率 5%，镇压力 45 kPa）

Fig. 3　Diagram showing calculation of FP (soil moisture content of 5%, compaction pressure of 45 kPa)

（2）求解波动带宽。为了计算波动带宽，首先定义曲线波动带，波动带是绝大多数数据点构成的区域。考虑到土质不完全均匀，土壤中会存在阻力过大的区域，导致探针贯入阻力曲线上出现随机离群点，采用四分位数法对 $F_{detrend}(d)$ 进行离群点筛选。为了更精确地识别离群点，设定四分位数法上下阈值倍数为 0.3 倍。由此求得下阈值 L 与上阈值 U 分别与曲线趋势线 $p_{trend}(d)$ 相加，得到带有曲线趋势的下阈值 L_{trend} 与上阈值 U_{trend}（图 4）。将 L_{trend} 和 U_{trend} 两条曲线之间的区域定义为曲线波动带（图 4），波动带垂直长度定义为曲线 FBW（图 4）。

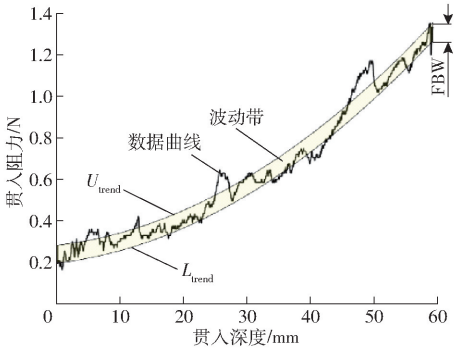


图 4　FBW 求解示意图（土壤含水率 10%，镇压力 15 kPa）

Fig. 4　Diagram showing calculation of FBW (soil moisture content of 10%, compaction pressure of 15 kPa)

（3）计算相对波动带宽。探针贯入阻力曲线相对于终峰值的波动幅度存在差异，例如在土壤含水率 10%、镇压力 15 kPa 条件下，曲线趋近“线性”变化（图 4）；在土壤含水率 0、镇压力 15 kPa 条件下，曲线趋近“带状”变化（图 5）。为使不同条件下曲线的波动具有可比性，采用相对波动带宽（波动带宽与终峰值比值）作为评价指标。

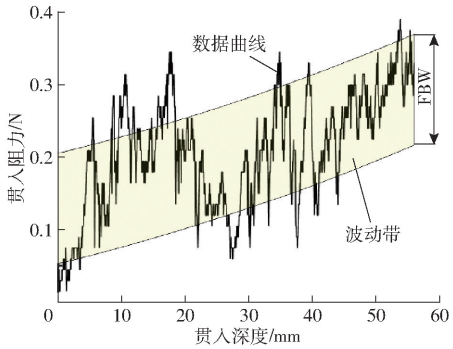


图 5 “带状”变化的探针贯入阻力曲线(土壤含水率 0,镇压力 15 kPa)

Fig. 5 A probe PR curve exhibiting “band-like” change (soil moisture content of 0, compaction pressure of 15 kPa)

1.3.3 探针贯入阻力曲线傅里叶能量

借鉴信号分析领域对时域信号的频谱分析方法,对探针贯入阻力曲线进行傅里叶变换,计算高频分量面积占比作为探针贯入阻力曲线傅里叶能量(PRFE),以评估阻力曲线高频比例。

(1)傅里叶变换。对探针贯入阻力曲线 F 进行傅里叶变换后得到的曲线 $Y(F)$ 为探针贯入阻力傅里叶曲线,傅里叶变换采样频率 f_{samp} 为最小采样距离 d_{samp} 的倒数,设 d_{samp} 为 0.031 5 mm。为了便于对比,将傅里叶变换后的数据进行归一化处理。

在信号分析领域中,以时间作为自变量,傅里叶变换结果表明不同时间跨度上的曲线波动情况。自变量是距离,对曲线进行傅里叶变换的结果表明不同距离跨度上的曲线波动。与信号处理领域原理相似,将探针贯入阻力形成一个完整波形时探针的行进距离称为“距离周期”RPE,将其倒数称为对应的“距离频率”RFR。

(2)探针贯入阻力曲线傅里叶能量求解。将探针贯入阻力傅里叶曲线中 RFR 大于等于 1 次/mm 的部分定义为微观波动,表示“高频区域”,其他为“低频区域”。当曲线呈“高频锯齿状”上升时(图 6a),曲线“高频”段能量较高(图 6b 和图 6d 中绿色部分为“高频”段能量);曲线上升较平滑时(图 6c),曲线“高频”段能量较低,“低频”段能量占主导(图 6d)。如图 6b 和图 6d 所示,设高频段曲线与 x 轴围成的面积为 S_H,低频段曲线与 x 轴围成的面积为 S_L,将曲线与 x 轴围成的总面积($S_L + S_H$)中 S_H 所占比例定义为对应微观波动的探针贯入阻力曲线傅里叶能量。

2 试验结果与分析

试验采用 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行双因素方差分析和多重比较,多重比较采用邓肯法,采用 0.05 的显著性水平。采用 Matlab R2017b 与 Origin 2014 作图,计算误差棒时采用标准差作为指标。

2.1 探针贯入阻力

图 7 为不同含水率条件下的探针贯入阻力变化曲线,随着探针贯入深度增加,曲线呈上升和波动特征:部分曲线最大贯入阻力不超过 1 N(图 7f),部分超过 3 N(图 7c);部分曲线垂直振幅较宽(图 7a),部分较窄(图 7c);部分横向波动较密集(图 7a),部分较稀疏(图 7e)。

贯入阻力上升可能是由于随着贯入深度增加,土壤对探针的摩擦力增大导致的。由于探针与土壤间的摩擦因数相对固定,摩擦力增加主要源于土壤对探针法向压力增大。法向压力持续上升原因为:①探针与土壤接触面积增大,导致法向压力增大。②探针贯入时推动土壤产生侧向位移,当贯入深度较浅时,表层土壤被顶起,释放了部分土内压力;而当探针贯入较深时,无法推升上方土壤,导致局部内部土壤压力升高,法向压力上升,这与 AIKINS 等[20]的观点一致。曲线上升过程中存在诸多波动可能是由于土壤为颗粒状或聚集成土块,当探针开始接触这些颗粒或土块时阻力增加;随着探针穿透土块,阻力继续上升形成局部峰值;当土块破碎或探针离开土块时阻力骤降形成局部谷值。探针在土壤中不断经历该过程,贯入阻力呈波动特征。

2.2 终峰值

图 8(图中相同小写字母表示相同含水率水平下不同镇压力水平指标之间差异不显著($p < 0.05$),相同大写字母表示相同镇压力水平下不同含水率小于的指标之间差异不显著($p < 0.05$),下

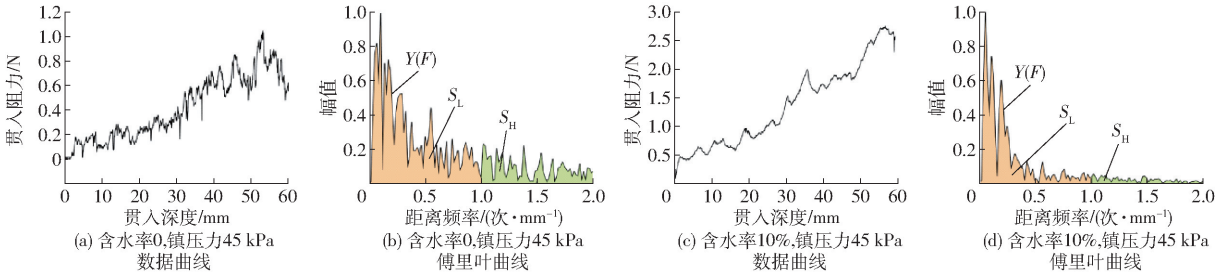


图 6 探针贯入阻力曲线傅里叶能量求解示意图

Fig. 6 Diagrams showing calculation of PRFE

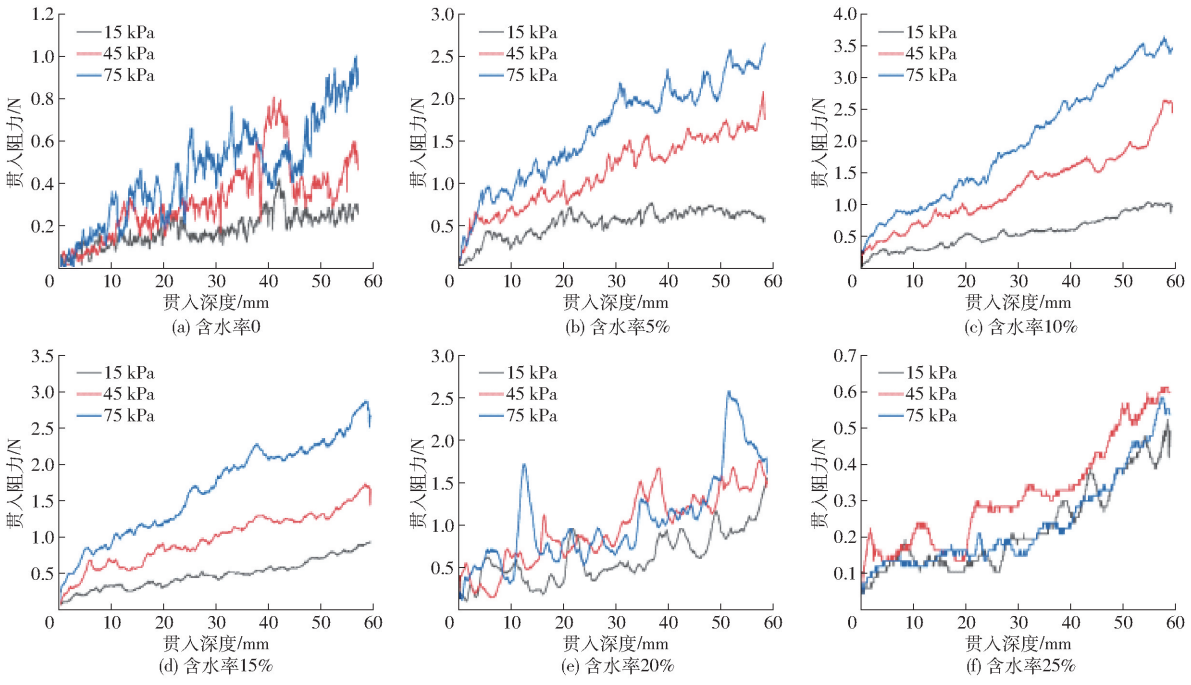


图 7　不同条件下探针贯入阻力曲线

Fig. 7　Penetration resistance curves of probe under various conditions

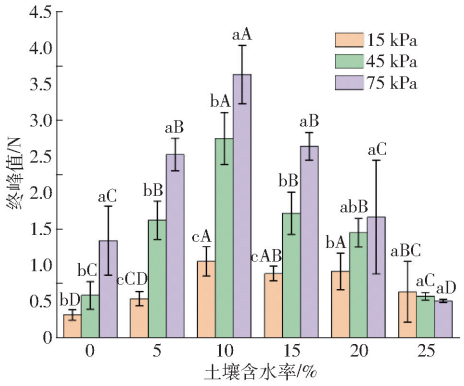


图 8　土壤含水率与镇压力对终峰值的影响及水平间差异

Fig. 8　Effects of soil moisture and compaction pressure on FP with differences between levels

同。)为土壤含水率和镇压力对终峰值的影响及因素水平间的显著差异。双因素方差分析(表 2)表明,土壤含水率(偏 $\eta^2 = 0.833$)和镇压力(偏 $\eta^2 = 0.784$)均呈显著性($p < 0.001$),且二者存在交互作用($p < 0.001$,偏 $\eta^2 = 0.633$)。

表 2　不同土壤含水率和镇压力下的终峰值双因素方差分析

Tab. 2　Two-way ANOVA of FP under different soil moisture contents and soil compaction pressure treatments

变异源	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*p*	偏 η^2
土壤含水率	44.051	5	8.810	89.556	<0.001	0.833
土壤镇压力	32.092	2	16.046	163.108	<0.001	0.784
土壤含水率×镇压力	15.251	10	1.525	15.502	<0.001	0.633
误差	8.854	90	0.098			
总变异	100.247	107				

2.2.1　土壤含水率对终峰值的影响

表 3 为多重比较得到的不同含水率下的终峰值。由表 3 可知,随含水率上升,终峰值先增加后减少,在含水率 10% 时最大,各含水率间均存在显著差异。当含水率为 0 时,终峰值为 0.753 N;含水率增加至 10% 时,终峰值达到峰值 2.492 N,较 0 时增长 230.94%。此后随含水率继续上升,终峰值下降,含水率 25% 时降至 0.577 N,较 0 时下降 23.37%。

表 3　不同含水率下的终峰值(多重比较结果)

Tab. 3　FP values at different levels of moisture content obtained through multiple comparisons

含水率/%	终峰值/N
0	(0.753 ± 0.529)^{d}
5	(1.573 ± 0.863)^{b}
10	(2.492 ± 1.149)^{a}
15	(1.759 ± 0.766)^{b}
20	(1.353 ± 0.564)^{c}
25	(0.577 ± 0.236)^{d}

注:不同字母表示含水率间差异显著($p < 0.05$),下同。

随着含水率上升,终峰值先增加后减少,这一现象由探针贯入阻力决定。阻力来源主要包括:①土壤内聚力产生的垂直阻力。②土壤对探针法向压力产生的摩擦阻力。③土壤与探针间的粘附力[21]。当土壤含水率为 0 时终峰值较低,可能是因为干燥土壤几乎无粘附力,贯入阻力主要来自探针推移土壤颗粒的反作用力及探针与土壤间的摩擦。随着含水率从 0 逐渐增加,终峰值上升,这可能是由于土壤

颗粒间内聚力增大,颗粒间摩擦增强,探针推移土壤颗粒所需能量增加;同时可能由于土壤作用于探针的粘附力增强[22],两因素共同导致终峰值上升。当含水率超过 10% 后,终峰值开始下降,这与 TEKESTE 等[23]的研究结果一致,这可能是由于土壤-水混合物中土壤内聚力在颗粒间表现更显著,而土壤颗粒形成的团聚体对外粘附力减弱,探针所受粘附力减小,反作用力降低;此外,水的润滑作用使摩擦减小,探针所受阻力降低。当含水率达到 25% 时终峰值最小,这可能是因为此时土壤内聚力与粘附力都较低,此时探针受到的垂直阻力、摩擦阻力与粘附力都较小,这与 LIAN 等[24]的观点一致。

2.2.2 土壤镇压力对终峰值的影响

表 4 为多重比较得到的不同镇压力下的终峰值。由表 4 可知,终峰值随镇压力增加而显著上升,各镇压力间差异显著。当镇压力为 15 kPa 时,平均终峰值为 0.731 N;当压力增至 45 kPa 时,终峰值较 15 kPa 增加 99.59%;当压力升至 75 kPa 时,终峰值较 15 kPa 增加 182.35%,这与 SONGÜL[25]的研究结果一致。

表 4 不同镇压力下的终峰值(多重比较结果)

Tab. 4 FP values at different levels of compaction pressure obtained through multiple comparisons

镇压力/kPa	终峰值/N
15	$(0.731 \pm 0.331)^{c}$
45	$(1.459 \pm 0.790)^{b}$
75	$(2.064 \pm 1.102)^{a}$

终峰值随镇压力增加而上升,这可能是因为镇压力增加提高了土壤干密度,导致土壤内部压力增大,进而终峰值上升,这与 NIE 等[26]的结论一致。由图 8 可以看出,低含水率(0 ~ 10%)土壤终峰值随镇压力增强而明显上升;但随着含水率增加,镇压力对终峰值的影响逐渐减弱,当含水率达 25% 时,终峰值几乎不受镇压力增加的影响。这可能是因为低含水率时土壤颗粒排列紧密、流动性差,导致土壤颗粒与探针间摩擦大,探针推移土壤颗粒更困难。当含水率进一步增加,土壤中的水分和滞留的气体阻碍了土壤颗粒的紧密排列,承担部分压实能量,减弱了镇压效果。高含水率(25%)时终峰值几乎不受镇压力影响可能是因为镇压力主要被土壤中的水分承担,土壤颗粒所受应力较小,而且土壤中水分和空气的存在导致该条件下误差棒范围较大(图 8)。

2.2.3 土壤含水率与镇压力的综合影响

如图 8 所示,低含水率(0 ~ 10%)条件下,高镇压力对终峰值的提升作用显著。当含水率为 0 时,镇压力 75 kPa 下的终峰值较 15 kPa 和 45 kPa 分别增加 319.97% 和 127.65%;中含水率(10% ~ 20%)条件下,高镇压力与低镇压力的终峰值差距逐渐缩小,表明高镇压力对终峰值的提升效应减弱,当含水率为 15% 时,45 kPa 较 15 kPa 高 93.43%,75 kPa 较 45 kPa 高 53.61%。高含水率(25%)时,3 种镇压力下的终峰值差异不显著。

当含水率为 0 ~ 10% 时,终峰值的显著增加可能与一定含水率下土壤自身紧实度较高有关。DA SILVA 等[27]的研究表明,土壤含水率增加会增强土壤的紧实度,这意味着含水率在此范围内时可能更容易被压实。当含水率为 10% ~ 25% 时,终峰值不仅开始下降,且下降幅度随镇压力增加而显著增大,这可能是因为土壤中的水分开始承担镇压力,导致土壤实际紧实度低于预期,即含水率越高,土壤实际紧实度与预期差距越大[28]。

2.3 相对波动带宽

探针贯入土壤过程中阻力存在波动,图 9 为土壤含水率和镇压力对相对波动带宽的影响及水平间的差异。双因素方差分析(表 5)表明,土壤含水率(偏 $\eta^2 = 0.630$)和镇压力(偏 $\eta^2 = 0.117$)对相对波动带宽均有显著影响($p < 0.05$),但二者无交互作用($p = 0.083 > 0.05$,偏 $\eta^2 = 0.162$)。

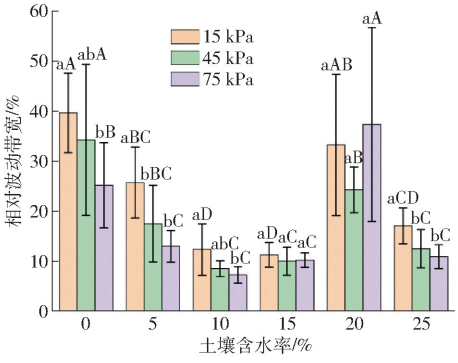


图 9 土壤含水率与镇压力对相对波动带宽的影响及水平间差异

Fig. 9 Effects of soil moisture and compaction pressure on RFBW with differences between levels

表 5 不同土壤含水率和镇压力下相对波动带宽双因素方差分析

Tab. 5 Two-way ANOVA of RFBW under different soil moisture contents and soil compaction pressure treatments

变异源	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*p*	偏 η^2
土壤含水率	0.989	5	0.198	30.712	<0.001	0.630
镇压力	0.077	2	0.038	5.971	0.004	0.117
土壤含水率×镇压力	0.112	10	0.011	1.743	0.083	0.162
误差	0.579	90	0.006			
总变异	1.757	107				

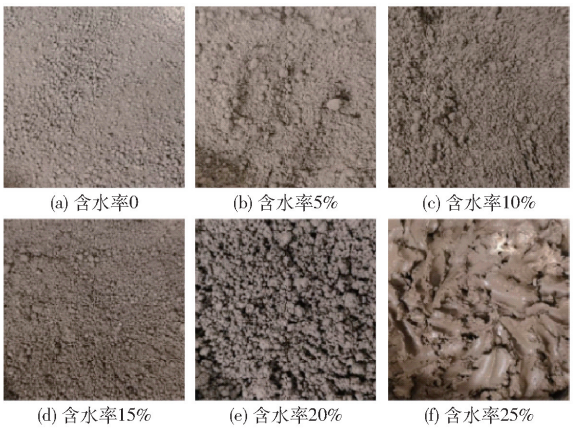
2.3.1　土壤含水率对相对波动带宽的影响

表 6 为多重比较得到的不同含水率下的相对波动带宽。由表 6 可知，当含水率为 0 ~ 15% 时，相对波动带宽随含水率增加而降低，当含水率为 20% 和 25% 时表现出单独特征。当含水率为 0 时相对波动带宽为 33.08%，当含水率为 5% 和 15% 时分别下降 43.14% 和 68.05%；当含水率为 20% 时相对波动带宽激增，为含水率 15% 时的 299.72%，且该含水率下的贯入阻力曲线（图 7e）波动稀疏，以少数大波动为主；当含水率增至 25% 时，相对波动带宽再次下降，为含水率 20% 时的 42.77%。不同含水率下土壤形态如图 10 所示。

表 6　不同含水率下相对波动带宽（多重比较结果）

Tab. 6　RFBW values at different levels of moisture content obtained through multiple comparisons

含水率/%	RFBW/%
0	(33.08 ± 12.02)^{a}
5	(18.81 ± 8.02)^{b}
10	(9.45 ± 3.78)^{c}
15	(10.57 ± 2.25)^{c}
20	(31.68 ± 14.39)^{a}
25	(13.55 ± 4.13)^{bc}



(a) 含水率0　(b) 含水率5%　(c) 含水率10%

(d) 含水率15%　(e) 含水率20%　(f) 含水率25%

图 10　不同含水率时土壤形态

Fig. 10　Soil morphology at different moisture contents

当含水率为 0 ~ 15% 时，相对波动带宽随含水率增加而降低，这可能是因为低含水率时土壤较硬，所形成的团聚体较脆，探针接触这些团聚体时阻力先增加，团聚体碎裂阻力骤降，这种阻力先增后骤降的组合导致阻力曲线波动显著，相对波动带宽较大。随着含水率增加，土壤变软、脆性降低[29]，质地更均匀[30]，团聚体破碎引起的贯入阻力变化减小，阻力骤降现象减弱，相对波动带宽降低，不同形态土壤如图 10a ~ 10d 所示。当含水率达 20% 时相对波动带宽激增（表 6），可能是因为该含水率下土壤性质发生显著变化。观察此条件下土壤形态（图 10e），推测是由于条件下土壤团聚体具有较强内聚力[31]，颗粒聚集成不同大小、内部粘附力和稳定性强的团块，团块间存在间隙；探针进入团块时阻力显著增加，在团块内穿行时阻力持续上升而不破碎，退出团块进入间隙时阻力骤降，这种反复进出团块的过程导致阻力出现大幅增减波动，相对波动带宽增大。对于图 7e 中观察到的几条明显且较大的波动曲线，原因为该含水率下形成的土壤团聚体尺寸较大（图 10e），探针穿透每个团聚体时，阻力曲线会根据团聚体尺寸产生相应尺度的波动，探针在土壤中遇到大小和结构不同的团聚体时，形成明显的阻力变化；由于团聚体内部较软，探针穿过时不会产生过密波动，因此穿行团聚体内部形成的阻力曲线呈现跨度较大且相对平滑的波动，随着探针继续深入，依次进出多个团聚体，导致贯入阻力曲线出现多个连续的大跨度波动。如表 6 所示，当含水率升至 25% 时，相对波动带宽再次下降，这可能是因为土壤形态发生显著变化，从堆叠的团聚体转变为粘性泥泞状态（图 10f），所有土壤聚集成一个整体，土壤组成更均匀，探针贯入时阻力波动减小，相对波动带宽降低。

2.3.2　土壤镇压力对相对波动带宽的影响

表 7 为通过多重比较得到的不同镇压力下的相对波动带宽。由表 7 可知，相对波动带宽随镇压力增加而降低，镇压力 75 kPa 时相对波动带宽降至 15 kPa 时的 74.62%。此外，从图 9 可看出，当含水率为 0 ~ 15% 时，镇压力对相对波动带宽的影响随含水率增加而减弱：含水率从 0 升至 5% 后，45 kPa 与 75 kPa 镇压力的相对波动带宽差异消失；含水率从 5% 升至 10% 后，15 kPa 与 45 kPa 的差异也不再显著；当含水率达 15% 时，3 种镇压力相对波动带宽差异均不显著。对于较高含水率情况，当含水率为 20% 时，不同镇压力对相对波动带宽的影响无显著差异；当含水率为 25% 时，15 kPa 镇压力相对波动带宽显著高于其他两种压力。

表 7　不同镇压力下的相对波动带宽（多重比较结果）

Tab. 7　RFBW at different levels of compaction pressure obtained through multiple comparison

镇压力/kPa	RFBW/%
15	(23.29 ± 12.92)^{a}
45	(17.90 ± 11.44)^{b}
75	(17.38 ± 13.51)^{b}

相对波动带宽随镇压力增加而降低，这可能是因为压实过程中更高的镇压力导致更多土壤团聚体破碎，同时使土壤内部更均匀，贯入过程中阻力波动减少，相对波动带宽降低。然而，含水率从 0 升至 15% 时，镇压力对相对波动带宽的影响减弱（图 9），这可能是因为随含水率增加，土壤硬度降低，土壤内

部紧实度趋于均匀,使探针贯入时的阻力波动较小,所以镇压力的影响随含水率增加而减弱。与之不同的是,当含水率增至 20% 时,虽然镇压力增加对相对波动带宽的影响依然趋于不显著(图 9),但这可能是因为含水率达 20% 时土壤性质发生了显著变化,团聚体更致密,抗压强度和可塑性更强,施加镇压力时团聚体不易被破坏,反而进一步压实;此外,由于团聚体紧实度增加,探针进入团聚体间隙时的阻力低于穿过团聚体时的阻力,导致波动幅度增大,而镇压力增加并未显著改变团聚体的存在状态,因此该条件下镇压力对相对波动带宽的影响有限。然而,此含水率下土壤仍非常不均匀,较小的镇压力(15 kPa)难以改变团聚体的均匀状态,较大的镇压力(75 kPa)可能进一步压实原本紧实的区域,与间隙形成更大阻力差。由于土壤结构的这种不均匀性,镇压力为 15 kPa 和 75 kPa 时的误差棒范围较大。而当含水率增加至 25% 时,镇压力 15 kPa 下的相对波动带宽显著高于其他两种压力,表明此时土壤均匀性较差,这可能是因为此时土壤呈泥泞状(图 10f),颗粒间水分较多,可能滞留空气,水分和空气分担部分镇压力,较低的镇压力不足以改变颗粒排列,土壤相对不均匀,相对波动带宽较高;只有镇压力足够高时,才能改善土壤均匀性,进一步降低相对波动带宽。

2.4 探针贯入阻力曲线傅里叶能量

从探针贯入阻力曲线的傅里叶变换结果中提取探针贯入阻力曲线傅里叶能量如图 11 所示。探针贯入阻力曲线傅里叶能量可在一定程度上表征土壤颗粒或团聚体的硬度和体积:颗粒及团聚体硬度高时,探针贯入阻力曲线波动显著,小颗粒引发局部锯齿状波动,大颗粒或团聚体导致宽幅波动,更多的锯齿状波动或更少的宽幅波动对应更高的探针贯入阻力曲线傅里叶能量,反之则探针贯入阻力曲线傅里叶能量更低。图 11 为土壤含水率和镇压力对探针贯入阻力曲线傅里叶能量的影响及不同水平间的差异。双因素方差分析(表 8)显示,土壤含水率(偏 $\eta^2=0.812$)和镇压力(偏 $\eta^2=0.247$)对探针贯入阻力曲线傅里叶能量均有显著影响($p<0.001$),且二者存在交互作用($p<0.001$,偏 $\eta^2=0.338$)。以下从含水率和镇压力角度分析单因素及其交互作用对探针贯入阻力曲线傅里叶能量的影响。

2.4.1 土壤含水率对探针贯入阻力曲线傅里叶能量的影响

表 9 为通过多重比较得到的不同含水率下的探针贯入阻力曲线傅里叶能量。由表 9 可知,当含水率为0 ~ 15% 时,探针贯入阻力曲线傅里叶能量随含水率增加呈下降趋势,含水率为 15% 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量降至 0 时的 85.80%,降幅 14.20%,但含水率 5%、10%、15% 间差异不显著;含水率为 20% 和 25% 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量发生特殊变化:含水率为 20% 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量显著降至 15% 时的 57.97%,含水率为 25% 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量又回升至 20% 时的 202.53%。

当含水率为 0 ~ 15% 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量随含水率的增加而降低,表明探针贯入阻力曲线中的高频抖动减少,意味着土壤内硬颗粒的减少。这可能是因为水分在土壤颗粒间起润滑作用,软化土壤并使探针在土壤内移动更平滑。当含水率

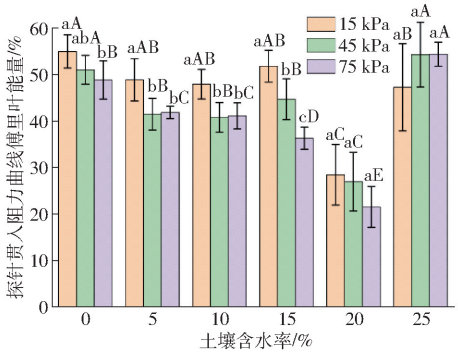


图 11 土壤含水率与镇压力对探针贯入阻力曲线傅里叶能量的影响及水平间差异

Fig. 11 Effects of soil moisture and compaction pressure on PRFE with differences between levels

表 8 不同土壤含水率和镇压力下探针贯入阻力曲线傅里叶能量双因素方差分析

Tab. 8 Two-way ANOVA of PRFE under different soil moisture content and soil compaction pressure treatments

变异源	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*p*	偏 η^2
土壤含水率	0.825	5	0.165	77.599	<0.001	0.812
镇压力	0.063	2	0.031	14.760	<0.001	0.247
土壤含水率×镇压力	0.098	10	0.010	4.588	<0.001	0.338
误差	0.191	90	0.002			
总变异	1.176	107				

表 9 不同含水率下探针贯入阻力曲线傅里叶能量(多重比较结果)

Tab. 9 PRFE values at different levels of moisture content obtained through multiple comparisons

土壤含水率/%	PRFE/%
0	(51.69 ± 4.29)^{a}
5	(44.13 ± 4.72)^{b}
10	(43.35 ± 4.45)^{b}
15	(44.35 ± 7.30)^{b}
20	(25.71 ± 6.26)^{c}
25	(52.07 ± 7.34)^{a}

达 20% 时，探针贯入阻力曲线傅里叶能量下降，这可能是因为此条件下土壤易团聚（图 10e），探针穿透这些团聚体导致阻力曲线出现许多宽幅波动（图 7e），使贯入阻力傅里叶曲线中低频分量比例增加、高频分量比例减少，探针贯入阻力曲线傅里叶能量显著下降，此时土壤内部均匀性较差。当含水率为 25% 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量再次上升，土壤呈泥泞状（图 10f），内部均匀性提高，宽幅波动数量减少（图 7f），贯入阻力傅里叶曲线中低频能量比例下降，高频能量比例上升。上述现象表明含水率从 0 开始上升时，土壤硬度和颗粒程度持续减小，内部硬度均匀性增加，当含水率为 15% 左右达峰值；含水率 20% 时土壤易结团，土壤内部的硬度均匀性下降；含水率进一步增加至 25% 时，土壤呈泥泞状，均匀性再次提高。

2.4.2　土壤镇压力对探针贯入阻力曲线傅里叶能量的影响

表 10 为通过多重比较得到的不同镇压力下的探针贯入阻力曲线傅里叶能量。由表 10 可知，探针贯入阻力曲线傅里叶能量随镇压力增加而显著降低，当镇压力为 45 kPa 和 75 kPa 时探针贯入阻力曲线傅里叶能量分别为 15 kPa 时的 92.82% 和 87.37%，减幅分别为 7.18% 和 12.63%。探针贯入阻力曲线傅里叶能量随镇压力增加而降低可能是因为更高的镇压力导致土壤压缩程度更大，颗粒排列更紧密[32]，这种致密的土壤结构减弱了探针贯入阻力曲线的锯齿状波动，降低了高频能量。

表 10　不同镇压力下的探针贯入阻力曲线傅里叶能量（多重比较结果）

Tab. 10　PRFE at different levels of compaction pressure obtained through multiple comparison

镇压力/kPa	PRFE/%
15	$(46.63 \pm 10.05)^{a}$
45	$(43.28 \pm 9.93)^{b}$
75	$(40.74 \pm 10.89)^{c}$

图 11 显示含水率为 25% 时，不同镇压力下探针贯入阻力曲线傅里叶能量随压力上升呈轻微增加趋势（虽不显著）。这可能是因为该含水率下土壤已呈泥泞状（图 10f），探针在泥浆中移动出现“打滑”现象，导致邻近区域阻力相似。在每个阻力相似区域，探针贯入时的阻力在变化与稳定间交替，使阻力变化曲线呈现许多“局部小方波”形态（图 7f），这些“小方波”贡献了高频分量，其比例越大，探针贯入阻力曲线傅里叶能量越大。随着镇压力增加，泥泞土壤更致密均匀，阻力相似的区域扩大，探针贯入阻力曲线上存在更长距离的高频“小方波”，即高频“小方波”数量增加，解释了探针贯入阻力曲线傅里叶能量的上升趋势。

3　结论

（1）终峰值随含水率呈“单峰曲线”特征，0 ~ 10% 时因水分增强颗粒粘附力与内聚力，终峰值增幅 230.94%；超过 10% 后终峰值回落，25% 时降至 0.577 N（低于 0 水平 23.37%）。镇压力通过压实土壤提升终峰值，但受含水率调控——低含水率时，镇压力显著增强终峰值；高含水率时，水分承担主要压力，不同镇压力下终峰值无显著差异。

（2）当含水率为 0 ~ 15% 时，土壤软化与均匀性提升使相对波动带宽从 33.08% 降至 10.57%；20% 时因强内聚力团聚体间隙导致阻力波动，相对波动带宽激增；25% 泥泞态土壤均匀性恢复，相对波动带宽回落至 13.55%。镇压力升高通过压碎团聚体降低相对波动带宽，但高含水率时效果减弱。含水率为 25%，镇压力为 15 kPa 的相对波动带宽显著高于45 kPa 与75 kPa，反映低镇压力难以压实泥泞土壤。

（3）当含水率为 0 ~ 15% 时，水分润滑减少高频抖动，探针贯入阻力曲线傅里叶能量从 51.69% 降至 44.35%；20% 时大团聚体引发低频波动，探针贯入阻力曲线傅里叶能量骤降至 25.71%；25% 时泥泞态土壤的高频“小方波”增多，探针贯入阻力曲线傅里叶能量回升。镇压力通过压实土壤降低探针贯入阻力曲线傅里叶能量，但含水率为 25% 时，压实后的均匀泥浆导致高频波动占比轻微上升，探针贯入阻力曲线傅里叶能量随镇压力的上升呈非显著增加趋势。

参　考　文　献

[1]　罗锡文，谷秀艳，胡炼，等. 大田无人化智慧农场农田边界识别技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：1 - 18.
LUO Xiwen，GU Xiuyan，HU Lian，et al. Research status and outlook of farmland boundary recognition technology in large-scale unmanned smart farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(2)：1 - 18. (in Chinese)

[2]　刘力宁，张洪奇，章子文，等. 无人智慧农场关键技术与构建模式——以“吨半粮”无人农场为例[J]. 智慧农业（中英文），2025，7(1)：70 - 84.
LIU Lining，ZHANG Hongqi，ZHANG Ziwen，et al. Key technologies and construction model for unmanned smart farms：taking the “1.5-ton grain per mu” unmanned farm as an example[J]. Smart Agriculture，2025，7(1)：70 - 84. (in Chinese)

[3] 孟雷,武永峰,胡新,等. 土壤表层湿度影响下冬小麦晚霜冻害及冠层光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(5):1482 - 1488.
MENG Lei,WU Yongfeng,HU Xin,et al. Effect of soil surface moisture on late frost damage in winter wheat and canopy spectral detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017,37(5):1482 - 1488. (in Chinese)

[4] ZHANG W,GAO W,REN T,et al. A novel approach to estimate soil penetrometer resistance from water content,bulk density,and shear wave velocity: a laboratory study on a loamy sand soil[J]. Geoderma,2020,368: 114276.

[5] GONG H,CHEN Y,WU S,et al. Simulation of canola seedling emergence dynamics under different soil compaction levels using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research,2022,223: 105461.

[6] TIAN M,QIN S,WHALLEY W R,et al. Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density,penetrometer resistance,water retention curve,least limiting water range and X-ray computed tomography[J]. Soil and Tillage Research,2022,221: 105420.

[7] 范家玮,张玉芳,李健,等. 郑州黄土状粉质黏土力学特性研究[J]. 中国铁道科学,2025,46(1):15 - 26.
FAN Jiawei,ZHANG Yufang,LI Jian,et al. Study on mechanical properties of loess silty clay in Zhengzhou[J]. China Railway Science,2025,46(1):15 - 26. (in Chinese)

[8] 廖茂权,孟运庭. 含水率与干密度对压实粉质壤土贯入阻力影响的试验研究[J]. 四川水力发电,2024,43(5):12 - 16,54.
LIAO Maoquan,MENG Yunting. Experimental study of the influence of the water content and dry density on the penetration resistance of compacted silty loam[J]. Sichuan Hydropower,2024,43(5):12 - 16,54. (in Chinese)

[9] 闫雷,喇乐鹏,董天浩,等. 耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(1):125 - 132.
YAN Lei,LA Lepeng,DONG Tianhao,et al. Soil physical properties and vertical distribution of root systems affected by tillage methods in black soil slope farmlands in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(1):125 - 132. (in Chinese)

[10] 于永堂,郑建国,刘争宏,等. 基于贯入阻力与含水率联测的黄土填方压实度检测方法[J]. 长江科学院院报,2018,35(3):129 - 134,143.
YU Yongtang,ZHENG Jianguo,LIU Zhenghong,et al. Method of measuring compaction degree of loess-filled ground based on simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(3):129 - 134,143. (in Chinese)

[11] SANG X,ZHANG K,YANG L,et al. Design and experiment of a stereoscopic vision-based system for seeding depth consistency adjustment[J]. Comput. Electron. Agric.,2024,225: 109345.

[12] DA SILVA R C,MCBEATH T M,ANTILLE D L,et al. Reversible strengthening behaviour of subsurface layers in sandy soils-understanding variable response to strategic deep tillage[J]. Soil and Tillage Research,2024,237: 105981.

[13] LIU S,CHEN J,GUO L,et al. Prediction of soil organic carbon in soil profiles based on visible-near-infrared hyperspectral imaging spectroscopy[J]. Soil and Tillage Research,2023,232: 105736.

[14] ACQUAH K,CHEN Y. Measurements and predictions of seedling emergence forces[J]. Biosyst. Eng.,2024,247: 1 - 12.

[15] NADERI-BOLDAJI M, ALIMARDANI R, HEMMAT A, et al. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part I: development of the model and evaluation of the model parameters[J]. Soil and Tillage Research,2013,134: 153 - 162.

[16] LIU Y,FENG H,FAN Y,et al. Improving potato above ground biomass estimation combining hyperspectral data and harmonic decomposition techniques[J]. Comput. Electron. Agric.,2024,218: 108699.

[17] 尉鹏亮,周昱宏,王若蓁,等. 基于超宽带雷达回波短时傅里叶变换的土壤含水率检测[J]. 农业机械学报,2024,55(8):352 - 360.
WEI Pengliang,ZHOU Yuhong,WANG Ruozhen,et al. Soil volumetric moisture content detection based on short-time Fourier transform of ultra-wide band radar echo[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):352 - 360. (in Chinese)

[18] JU J,CHEN G,LV Z,et al. Design and experiment of an adaptive cruise weeding robot for paddy fields based on improved YOLOv5[J]. Comput. Electron. Agric.,2024,219: 108824.

[19] DE OLIVEIRA MORAIS P A,DE SOUZA D M,MADARI B E,et al. A computer-assisted soil texture analysis using digitally scanned images[J]. Comput. Electron. Agric.,2020,174: 105435.

[20] AIKINS K A,BARR J B,ANTILLE D L,et al. Analysis of effect of bentleg opener geometry on performance in cohesive soil using the discrete element method[J]. Biosyst. Eng.,2021,209: 106 - 124.

[21] WANG Y M,XUE W L,MA Y H,et al. DEM and soil bin study on a biomimetic disc furrow opener[J]. Comput. Electron. Agric.,2019,156: 209 - 216.

[22] CHESHOMI A,JAFARI M,RAJABI A M. Results of cone and piston pull-out tests for evaluation of clay-soil adhesion[J]. Soil and Tillage Research,2023,225: 105552.

[23] TEKESTE M Z,WAY T R,SYED Z,et al. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Journal of Terramechanics,2020,88: 41 - 52.

(下转第 204 页)

[22] 王发明,倪昕东,张旗,等. 基于 MobileNetV2 - CBAM 的机收场景下冬小麦成熟期在线分类识别方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1):71 - 80,100.
WANG Faming,NI Xindong,ZHANG Qi,et al. Online classification and identification method of winter wheat maturity under mechanical harvesting scenario based on MobileNetV2 - CBA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 1):71 - 80,100. (in Chinese)
[23] 李凯雨,朱昕怡,马浚诚,等. 基于混合扩张卷积和注意力的黄瓜病害严重度估算方法[J]. 农业机械学报,2023,54(2):231 - 239.
LI Kaiyu,ZHU Xinyi,MA Juncheng,et al. Estimation method of leaf disease severity of cucumber based on mixed dilated convolution and attention mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):231 - 239. (in Chinese)
[24] 奚小波,丁杰源,翁小祥,等. 基于轻量化 YOLO v5s - MCA 的番茄成熟度检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(3):383 - 391,436.
XI Xiaobo,DING Jieyuan,WENG Xiaoxiang,et al. Tomato maturity detection method based on lightweight YOLO v5s - MCA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):383 - 391,436. (in Chinese)
[25] 李尚平,卞俊析,李凯华,等. 基于改进 YOLO v5s 的复杂环境下蔗梢分叉点识别与定位[J]. 农业机械学报,2023,54(11):247 - 258.
LI Shangping,BIAN Junxi,LI Kaihua,et al. Identification and height localization of sugarcane tip bifurcation points in complex environments based on improved YOLO v5s[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):247 - 258. (in Chinese)
[26] HU J,SHEN L,SUN G,et al. Squeeze-and-excitation network[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),2018:7132 - 7141.

(上接第 176 页)

[24] LIAN B,PENG J,ZHAN H,et al. Mechanical response of root-reinforced loess with various water contents[J]. Soil and Tillage Research,2019,193: 85 - 94.
[25] SONGÜL G. Soil compaction due to increased machinery intensity in agricultural production: its main causes, effects and management[M]// FIAZ A,MUHAMMAD S. Technology in Agriculture. Rijeka: IntechOpen, 2021.
[26] NIE Y,NI W,LÜ X,et al. Macroscopic mechanical behavior and microstructural evolution of compacted loess in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research,2023,232: 105767.
[27] DA SILVA E E,BAIO F H R,KOLLING D F,et al. Variable-rate in corn sowing for maximizing grain yield[J]. Sci. Rep.,2021,11(1): 10.
[28] 穆璇,吴玉琴. 增湿对斥水土壤压实性的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(10): 199 - 208.
MU Xuan,WU Yuqin. Effect of humidification on the compactness of water-repellent soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(10): 199 - 208. (in Chinese)
[29] LAMICHHANE J R,BOIFFIN J,BOIZARD H,et al. Seedbed structure of major field crops as affected by cropping systems and climate: results of a 15-year field trial[J]. Soil and Tillage Research,2021,206: 104845.
[30] 熊乾,高磊,彭新华,等. 黑土区水蚀坡耕地土壤穿透阻力时空变异特征及传递函数[J]. 水土保持学报,2024,38(4): 162 - 169,180.
XIONG Qian,GAO Lei,PENG Xinhua,et al. Spatio-temporal characteristics and pedotransfer of soil penetration resistance in eroded sloping farmland of black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(4): 162 - 169,180. (in Chinese)
[31] QIU T,LIU C,ZHONG X,et al. Experimental research on the impact of temperature on the adhesion characteristics of soil-structure interface[J]. Geofluids,2020,2020: 6675576.
[32] CHEN X,CRUSE R M,NIU S,et al. Effect of loading time on soil structural failure[J]. Soil and Tillage Research,2019,186: 87 - 93.