第45卷 第3期 华 中 农 业 大 学 学 报 Vol.45 No.3
2026年 5月 Journal of Huazhong Agricultural University May 2026,304～313

张国忠,夏经久,戴胜,等.便携式田间土壤稳态流变测量仪的设计与试验[J].华中农业大学学报,2026,45(3):304-313.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.03.028

便携式田间土壤稳态流变测量仪的设计与试验

张国忠,夏经久,戴胜,黄恩林,纪瑞杰,曹永康,王洪昌

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要 为实现水田土壤流变特性的便携式快速准确测定,设计一种基于稳态剪切原理的便携式土壤稳态流变测量仪。该仪器由平行板式转子测量夹具、动态扭矩传感器、伺服电机及工控屏组成,基于"3/4R法"修正原理推导出修正公式,可测得被测土壤整体黏度;采用LabVIEW平台开发上位机进行数据采集与处理,可实现稳态速率扫描与稳态时间扫描2种测试模式。相同剪切条件下与实验室流变仪的对比试验结果显示,自研流变仪在传感、控制与信号采集环节具有良好的稳定性与准确性,能够有效反映被测土壤的本构关系及稳态流变特征。田间试验结果显示,在稳态时间扫描模式下,剪切应力随剪切时间延长呈幂函数形式衰减并逐渐稳定,反映土壤在连续剪切作用下的结构破坏与重排过程;在稳态速率扫描模式下,剪切应力随剪切速率增大先快速下降后趋于稳定,在70 s^{-1}与150 s^{-1}阶段,土壤表现出典型的剪切稀化特性。

关键词 土壤;稳态剪切;便携式测量;LabVIEW;剪切应力

中图分类号 S237 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)03-0304-10

提高机具作业效率、降低能量消耗始终是农业机械领域的重要研究方向[1-2]。在农业机械作业过程中,土壤物理性质、作业部件结构参数以及土壤与机械触土部件之间相互作用等均会对机具行走效率产生影响。为使水田土壤适宜作物种植,一般需要经过浸泡、耕整、静置等步骤,最终形成含水率高、流动性强的扰动饱和土壤[3-5],此时土壤流变特性最为显著,尤其是土壤的黏度和剪切应力,其中土壤的剪切应力影响着机械的牵引力需求和作业深度,黏度则影响着作业设备与土壤之间的摩擦力和通过性。

目前,土壤流变特性的研究多依赖于实验室流变仪(如旋转流变仪、锥板式或同心圆筒式流变装置),通过对土样进行剪切试验,获取土壤剪切应力与剪切速率关系,进而分析土样相应流变学规律[6-8]。实验室流变仪测量时通常需要将田间土壤筛分、除杂、配制相应含水率后装入特定几何转子夹具中进行测试。在土样搬运与剔除土壤杂质的过程中,土壤原有组成部分、含水率、内部结构等均会与田间土壤有较大差异,从而使所测流变参数变化趋势与土壤在实际耕作环境中的真实行为规律存在偏差[9-10]。此外,实验室流变仪通常针对均质或无杂质样品而设计,其转子结构和扭矩传感器在测量沙砾、根系、有机残体等介质时容易出现测量结果不稳定或夹具损伤的问题。

现有便携式流变测量仪在剪切速率控制范围方面存在局限。受传感器量程、转轴刚度、转速精度等因素制约,流变测量仪普遍只能在较低剪切速率(约0.1～100 s^{-1})区间内运行[11-14],难以实现对宽范围剪切场的稳定加载,这一速率区间仅覆盖了流变曲线中低剪切阶段,无法充分揭示非牛顿流体在高剪切速率下的剪切应力及黏度突降、屈服应力衰减等关键特征,尤其在模拟农机具触土作业过程中,土壤与触土部件接触时,二者界面常处于数百至上千每秒的强剪切状态,低速剪切测试所得结果难以反映实际作业条件下的流变响应,从而限制了流变测量仪在农业机械结构优化和功耗预测中的应用。

土壤流变参数是表征土壤流动行为与内部结构特性的重要指标,对农业机械作业阻力、能耗及触土部件结构优化具有重要意义。选择合适的流变测试模式,是准确获取真实土壤流变参数的前提。一般

收稿日期:2025-10-25
基金项目:国家自然科学基金项目(32572223;51775220);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201934);国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02);中央高校基本科研业务费专项(2662024GXPY012)
张国忠,E-mail:zhanggz@mail.hzau.edu.cn
通信作者:王洪昌,E-mail:wanghc84@mail.hzau.edu.cn

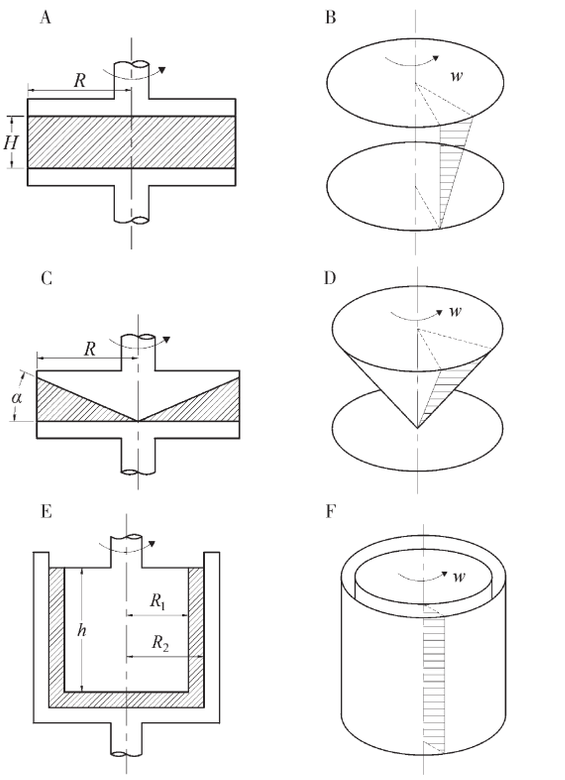
流变仪常包含3种测试模式：稳态也称流动(steady-state/flow)、振荡(oscillation)与阶跃(step)模式，三者在测试原理及适用对象上存在明显差异。稳态测试通过连续旋转施加恒定剪切速率或应力，在样品达到剪切平衡后测量稳态下剪切速率与扭矩，从而计算剪切应力与黏度等稳态参数[15-16]；振荡模式主要用于研究材料的黏弹性参数，适用于小应变的流体体系；阶跃模式则用于研究应力突变下的瞬态响应，常用于黏弹体或触变性流体的结构恢复分析。采用稳态测试模式能够更真实地反映机具作业过程中土壤的应力-速率关系及黏度变化规律。对于农业土壤而言，其在耕作、压实、搅拌等实际工况下处于持续、非瞬时的剪切过程，其流动特征更接近稳态流动条件[17-18]。此外，稳态测试具有测量结果稳定、数据连续性好的优势，适合建立农机作业与土壤流变特性之间的关系。

本研究研发一种基于稳态剪切原理的便携式稳态流变测量仪，通过自行设计的便携式测量装置在土壤实际环境中直接施加稳态剪切作用，可实时获取剪切应力、黏度等参数，避免土样转移产生的误差，真实地反映土壤的流变响应特性，为农业机械触土特性研究及农机设计参数优化提供新的技术途径。

1　材料与方法

1.1　转子结构选择

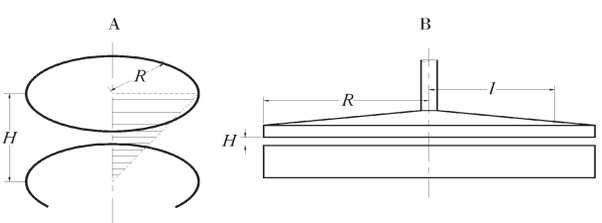
在流变学测量中，常用的转子形式包括平行板、锥板及同心圆筒3种[19]，如图1所示。锥板结构因其间隙恒定、剪切速率分布均一，常用于低黏度液体的精细流变表征，但其间隙通常仅为数十微米至数百微米，对于含沙粒、杂质多的水田土壤难以装填和稳定剪切，易导致固相团聚或堵塞，影响测量准确性；同心圆筒结构能够保证较长的剪切路径，适合高黏度流体测量，但其环隙较窄，土壤颗粒在加载过程中容易产生架桥或沉降分层现象，且样品装填与清理较为复杂，不利于田间快速测定。因此，本研究选择平行板转子进行土壤稳态流变测试。



A、C、E阴影部分为被测土壤A，C，and E show the tested soil；B、D、F阴影部分为剪切速率分布流场B，D，and F show the shear rate distribution flow field；A：平行板式转子Parallel-plate rotor；B：平行板式几何流场Parallel-plate geometric flow field；C：圆锥式转子Cone rotor；D：圆锥式几何流场Cone geometric flow field；E：同心圆筒式转子Concentric cylinder rotor；F：圆筒式几何流场Cylindrical geometric flow field.

图1　流变常用转子测量夹具

Fig.1　Common rheometer rotor fixtures



A：剪切速率分布流场Shear rate distribution flow field；B：平行板转子结构Parallel plate rotor structure.

图2　平行板转子工作图示

Fig.2　Working diagram of parallel plate rotor

1.2　测量原理

1)平行板转子测量原理。平行板转子工作时，被测土壤由上至下剪切速率不均一，随剪切圆半径增大呈线性递增，在板边缘处剪切速率达到最大，此为平行板剪切流场不均一的特点[20]。如图2所示，上板以设定转速运行时，下板保持静止，被测土壤的剪切速率在板间呈线性分布，其速度分布为：

$$\dot{\gamma}_l=\frac{2\pi nl}{H} \tag{1}$$

式(1)中：l为与平行板圆心处的距离，mm；$\dot{\gamma}_l$为距下平行板圆心l处的剪切速率，s^{-1}；n为上平行板转速，r/s；H为两平行板间距，mm。

2)剪切应力-扭矩关系推导。为了获得简单的

剪切条件，通常将转子半径R和板间距H之间的关系$2R$:H值选择在10～50[16]，随着板间距的增加，边缘处出现湍流条件或物质损失的风险会更高。为避免平行板稳态剪切测试在高剪切速率下出现滑移甩出现象，试验均选择R为25 mm，H为2 mm的条件下进行[21]。在测量时，所得扭矩为上平行板剪切土壤时产生的扭矩，由此扭矩换算所得剪切应力、黏度为被测土壤上表面等相关流变参数。

如图3所示，l处的剪切应力τ_l与上平行板所受扭矩M相关，对l处剪切应力进行积分得扭矩M：

$$M=\int_0^R 2\pi\tau_l l^2\,\mathrm{d}l \tag{2}$$

式(2)中：M为上平行板所受扭矩，N•m；τ_l为下平行板距圆心l处土壤剪切应力，Pa；R为平行板半径，mm。

扭矩计算公式：

$$M=\frac{\pi\tau R^3}{2} \tag{3}$$

式(3)中：τ为被测土壤剪切应力，Pa。

剪切应力与扭矩关系式：

$$\tau=\frac{2M}{\pi R^3} \tag{4}$$

式(4)中：τ为被测土壤剪切应力，Pa。

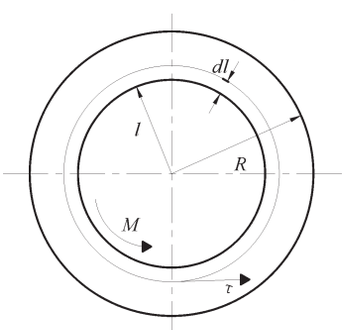


图3 转子扭矩微分图示

Fig.3 Parallel plate rotor structure

3)3/4R修正法。一般来说，对于牛顿流体而言，使用式(4)计算流体的剪切应力是适用的，但对于土壤这类非牛顿流体，在平行板剪切流场下，剪切速率从圆心向外逐渐增大，其剪切应力会随剪切速率的变化发生改变，因而不同半径位置的土壤受剪强度并不一致。不能依据牛顿流体剪切应力公式计算，可依据Weissenberg-Rabinowitsch方程对式(4)进行修正，得到非牛顿流体计算公式[22]：

$$\tau_R=\frac{2M}{\pi R^3}\left(\frac{3}{4}+\frac{1}{4}\frac{\mathrm{d}\ln M}{\mathrm{d}\ln\dot{\gamma}}\right) \tag{5}$$

对于非牛顿流体而言，l在3/4R处进行等效替代最为合适，3/4R修正法采用一种简化思路：不对整个半径方向逐点修正，而是选取距圆心3/4R处的剪切速率与剪切应力作为该试样的等效值，对应土壤在该转速下的稳态流变状态，靠近外缘的环带对扭矩贡献更大，但外缘又更容易出现甩出、滑移等边界影响；若直接取外缘数据，结果容易受边界效应干扰，选取3/4R位置可在“扭矩贡献较大”和“边界干扰较小”之间取得较合适的平衡，使计算结果更稳定、更便于重复[23-24]。

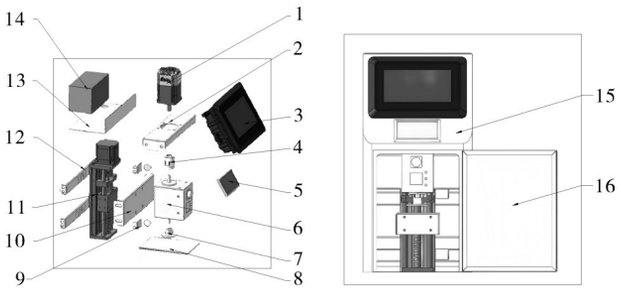
因此，本仪器选用距圆心3/4R处的土壤剪切速率作为被测土壤的剪切速率(下文简称“3/4R法”)。将l取3/4R带入式(2)～(4)得3/4R处等效土壤剪切应力、黏度关系式：

$$\begin{cases}\tau_{\frac{3}{4}R}=\dfrac{3M}{2\pi R^3}\\ \upsilon_{\frac{3}{4}R}=\dfrac{2MH}{\pi\omega R^4}\end{cases} \tag{6}$$

式(5)中，$\mathrm{d}\ln M/\mathrm{d}\ln\dot{\gamma}$表示扭矩对剪切速率变化的敏感性，值等于1时即为牛顿流体计算公式，该方程可以根据$\mathrm{d}\ln M/\mathrm{d}\ln\dot{\gamma}$的实时比值计算出对应的剪切应力，但计算量过大，且过程繁琐，一般商用流变仪不常采用此法，且该方法本质上需要对扭矩-剪切速率曲线求导以获得$\mathrm{d}\ln M/\mathrm{d}\ln\dot{\gamma}$，当材料呈现明显的剪切稀化、屈服或触变行为时，导数项的波动会更加显著，对数据采样密度与信噪比提出较高要求，且在田间快速测定场景下易放大扭矩波动与瞬态扰动带来的误差。而另一种更为便捷的方法是采用牛顿黏性定律($\tau=\upsilon\dot{\gamma}$)，结合平行板几何结构剪切速率线性递增的特性，以特定半径的测量结果完成对整体被测土壤的测量结果的等效替代，在该位置计算出一对剪切速率和剪切应力值，且无需进一步修正[25]。将式(6)写入LabVIEW数据处理程序，输出“3/4R法”修正后的被测土壤剪切应力及黏度值。

1.3 整体结构设计

设计的水田土壤便携式稳态流变测量仪以平行板式测量夹具为核心，由转子机构、传动机构、数据采集控制系统构成(图4)，其中转子机构分为上/下平行板、丝杆滑台，传动机构包括伺服电机、联轴器、动态扭矩传感器及丝杆滑台，利用伺服电机、扭矩传感器对土壤展开稳态剪切试验，数据采集控制系统主要集成在工控屏上，在工控屏上依托LabVIEW平台开发上位机对扭矩、转速等数据的采集及处理，并下发控制指令。



1. 伺服电机 Servo motor；2. 电机支撑板 Motor support plate；3. 工控屏 Industrial control screen；4. 联轴器 Coupling；5. 板间距控制器 Plate gap controller；6. 动态扭矩传感器 Dynamic torque sensor；7. 上平行板 Upper parallel plate；8. 下平行板 Lower parallel plate；9. 限位开关 Limit switch；10. 扭矩支撑板 Torque support plate；11. 丝杆滑台 Ballscrew linear stage；12. 丝杆固定板 Ballscrew mounting plate；13. 电池架 Battery bracket；14.24 V 电池 24 V battery；15. 仪器外部框架 Instrument outer frame；16. 仪器前门 Instrument front door.

图 4　平行板式稳态流变参数测量仪装置结构图

Fig.4　Parallel plate type steady state rheological parameter measuring instrument device structure diagram

平行板结构由 1 个旋转的上板和 1 个静止的下板组成，升降电机调整下平行板所置土壤与扭矩传感器的接触位置，转向电机驱动转轴旋转进行剪切，剪切过程中，动态扭矩传感器实时获取土样受剪产生的扭矩信号，通过 RS485 通讯将电信号输出至工控屏，上位机基于 LabVIEW 的 VISA 接口完成数据采集与预处理，并将扭矩换算为剪切应力及剪切速率，进一步计算表观黏度等稳态流变参数，最终在上位机界面实现结果显示与存储。

1.4　测控系统结构设计

测量仪的测控系统由传动执行机构、数据采集控制系统两大部分组成。系统通过对伺服电机、动态扭矩传感器的控制，实现对剪切速率、扭矩及位移等关键参数的测量及反馈。

1）传动执行机构。传动执行机构主要由伺服电机、联轴器、动态扭矩传感器及丝杆滑台组成，是实现平行板板间距调节和控制上平行板剪切速率的关键。伺服电机通过 RS485 通信接口与工控屏连接，在上位机的指令控制下，根据所输入转速值，上位机可发送角位移指令，使电机输出相应转速，通过联轴器联接上平行板开始旋转。丝杆滑台则由步进电机、丝杆、下平行板组成，步进电机通过螺纹传动将旋转运动转化成直线运动，丝杆旋转使下平行板高度发生变化，从而实现板间距的调节，滑台两端设有限位开关，当滑块触及行程端点时，系统能自动切断驱动或发出停机信号，以防止机械过冲或结构损伤，保证试验安全。

在土壤流变测试过程中，转子需在不同剪切速率下持续运行，土壤的剪切应力随时间和含水率变化而波动。为实现实时响应与高频采样，选用常青 D200 动态扭矩传感器，其具备高灵敏度与宽频响特性，能够在转子旋转过程中连续采集扭矩信号，并与转速同步传输至上位机，能更连续实时反映土壤在稳态剪切下的力学响应规律，为后续流变参数计算提供可靠数据支撑。

2）数据采集控制系统。工控屏需要支持 Windows 系统，安装 LabVIEW 进行调试、测量。选用 TPC070-W6 工业嵌入式控制屏，作为核心控制与数据处理单元，其作用在于集成人机交互界面、实时数据采集与控制逻辑执行。仪器通过搭载 Windows 系统与 LabVIEW 开发平台，数据采集控制系统界面如图 5 所示，实现土壤样品稳态剪切测试中剪切应力、剪切速率及黏度的测量。

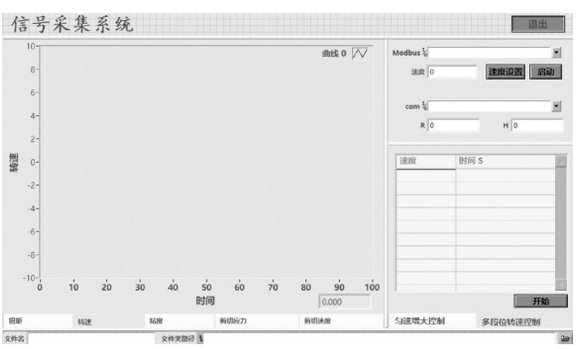


图 5　数据采集控制系统界面

Fig.5　Data acquisition and control system interface

通过 VISA 串口向动态扭矩传感器发送读数请求、读取原始字节数据，解析成物理量，把结果显示在界面中并写入 CSV 文件。具体流程如下：(1)选择储存路径：建立 CSV 文件路径和文件名，用来存储采集的数据和计算结果；(2)通信初始化：选择串口号，并设置波特率，发送指令帧，采集传感器原始数据；(3)数据解码与处理：将串口返回的字节数组拆分并转换成数值；(4)物理量计算：根据输入的计算公式，将原始量转换成物理量；(5)将计算结果显示到前面板，调用写文件 VI 并将结果储存到指定位置；(6)循环重复，采集数据。总控制程序逻辑流程如图 6 所示。

用户可以设定 2 种运行模式：(1)稳态时间扫描：在固定剪切速率或剪切应力条件下，连续记录土壤随时间变化的剪切应力或黏度响应；(2)稳态速率扫

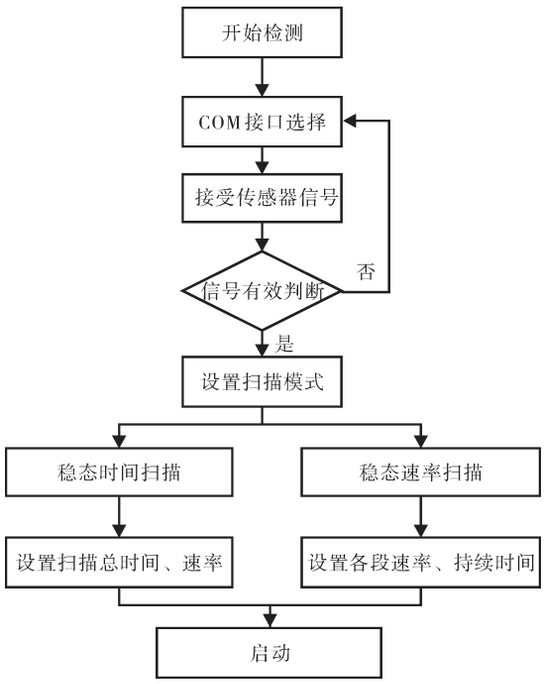


图6 控制程序逻辑流程图

Fig.6 Flowchart of control program logic

描:研究材料在不同剪切速率下的剪切应力和黏度变化规律。测试时,流变仪在一系列设定的剪切速率下依次施加稳定的剪切作用,待每一段剪切速率下达到稳态时实时记录测量值。

1.5 仪器性能及特点

设计的便携式稳态流变测量仪以田间土壤稳态流变参数的检测为目标,可实现土壤在自然状态下的剪切特性测量。该仪器主要性能指标见表1。

表1 仪器性能指标

Table 1 Instrument performance indicators

项目 Item	数值 Value
工作电压/V Operating voltage	24
转子扭矩/(N·m) Rotor torque	0~0.64
扭矩测量精度 Torque measurement accuracy	0.1% FS
控制方式 Control mode	LabVIEW 上位机
剪切速率/s^{-1} Shear rate	0~7 850
剪切应力/Pa Shear stress	0~19 566
采样频率/Hz Sampling frequency	1~1 000

1.6 仪器校准

为验证仪器测量的准确性,使用市场应用型流变仪及本仪器分别进行测量,得到剪切应力-时间关系,对两者所得拟合方程误差进行分析,若误差在置信区间内,则表明仪器测量结果可用于田间便携式土壤稳态流变参数检测。

1)配置土壤。①风干。取田间原状土样,破碎成1 cm左右的小块,平铺于瓷盘中,在通风条件下自然干燥约1周。干燥后测定初始含水率,作为后续配制的参考值。②研磨过筛。使用橡胶锤轻轻敲碾土样,使其松散,再依次通过孔径2、1及0.075 mm筛,以获得不同粒径等级的土壤颗粒。③配制。根据笔者所在课题组前期测试结果,试验土壤的沙粒、粉粒、黏粒等颗粒质量比为7:8:5,为简化试验过程,将过孔径2、1和0.075 mm筛的土壤颗粒按质量比2:2:1混合配制,取总质量为500 g的混合土样作为试验用土。④配制含水率30%土壤。根据干基含水量公式,计算加水量。

2)稳态流变试验。采用配制的含水率30%土样开展稳态流变测试。试验采用2种仪器进行对比测定:一为本研究自主研制的便携式土壤稳态剪切流变仪,另一为美国TA Instruments公司生产的DHR-1型旋转流变仪(discover hybrid rheometer-1)(图7)。为保证测量结果的可比性,2种仪器的测量条件保持一致,平行板间距均设定为2 mm。在试验过程中,分别选取剪切速率为10、80、200、500及1 000 s^{-1}的全范围稳态剪切条件,对配制土样进行分级加载测试,记录其在不同剪切速率下的剪切应力响应及稳态流变特性参数变化。



图7 DHR-1流变仪

Fig.7 DHR-1 rheometer

1.7 田间试验

试验选取华中农业大学水稻试验田典型0~30 cm耕作层土壤(30°47′N,114°37′E)作为研究对象,试验前对土壤进行预处理,确保土壤表面平整、无明显突起或凹陷,并通过机械压实以达到一定的坚实度。经测量,土壤初始含水率为32%,为避免其对试验结果的影响,试验均在相同初始含水率和坚实度条件下进行稳态剪切测量。

根据流变测试的不同目标与工况特征,田间试验分别采用稳态时间扫描模式与稳态速率扫描模式2种方式测试,以分析土壤在恒定剪切与变速剪切条

件下的流变响应特性(图8)。

1)时间扫描模式。时间扫描主要用于观测土壤在恒定剪切速率下剪切应力随时间变化规律。为满足典型农业机械触土部件工作时土壤的剪切速率范围,分别选取100、400、800 s^{-1}进行测试。取样后在上述3个剪切速率下分别运行2 min,记录剪切应力随时间的变化情况。该方法可以直观地反映土壤在持续剪切过程中的剪切应力随时间变化规律,展示土壤在不同剪切速率下由“初始稳定-结构被破坏-趋于稳定”的变化过程,为分析不同剪切速率下土壤内部结构随时间变化的规律提供依据。

2)速率扫描模式。速率扫描一般用于分析土壤剪切速率变化对剪切应力的影响规律。该模式采用同一土壤样品,按照剪切速率从低到高依次设置6个阶段,分别为70、150、350、500、750和900 s^{-1},每阶段持续剪切1 min。通过连续速率递增的方式记录剪切应力与黏度的变化过程,进而分析其是否具有剪切稀化或屈服特性。通过同一土样的连续剪切测试实现速率分段扫描,更接近土壤在实际农业机械作业中受剪速率变化的工况过程(图8)。



图8　自研流变仪现场实物图

Fig.8　*In situ* photograph of the self-developed rheometer

2　结果与分析

2.1　仪器校准测量结果

在各设定剪切速率下,每组试验均持续运行2 min,以确保土样在加载过程中达到稳定剪切状态。为排除起始加载阶段的瞬态波动影响,选取试验后30 s内的数据作为稳态阶段,对应的剪切应力与黏度值即为该速率下的稳态流变参数(图9)。分别提取2种仪器在剪切速率10、80、200、500、1 000 s^{-1}时的稳态剪切应力与黏度值,获得其完整的稳态流变响应曲线(图9)。

试验结果表明,在剪切过程的90～120 s阶段,2种仪器测得的剪切应力变化趋于平缓,体系内部逐渐达到稳态流动状态。此时,2种仪器所得剪切应力随时间变化的趋势基本一致,说明该仪器核心传感与控制系统运行稳定,在响应特性上与标准流变仪具有较高一致性,能够较真实地反映被测土壤的本构关系及其稳态流变特性。但测量结果之间仍存在一定的固定差值,推测主要来源于系统误差,包括扭矩传感器标定偏差、转动部件机械摩擦及信号采集环节中的量化误差等因素。通过后续的系统校准与参数优化,可有效减小系统误差,提高自研流变仪的测量精度与稳定性。

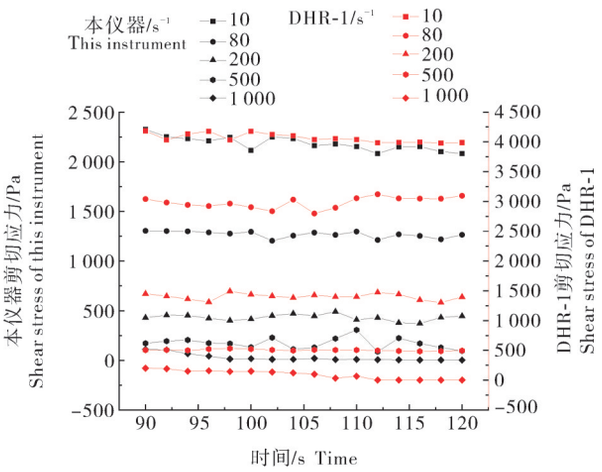


图9　2种仪器5种剪切速率下剪切应力对应的稳态值

Fig.9　Steady-state shear stress values at five shear rates for two instruments

2.2　校准方程

进一步分析自研流变仪与标准流变仪测量结果之间的对应关系,结果如图10所示,2种仪器所得剪切应力随剪切速率的变化趋势总体一致,均表现出典型的非牛顿流体剪切稀化特性,即剪切速率增大时,剪切应力呈非线性增长趋势。

为定量评估2种仪器测量结果间的线性相关性,对不同剪切速率下的稳态剪切应力数据进行线性回归分析,建立校准方程:

$$Y_{\mathrm{DHR-1}}=1.83X_{\text{自研}}+315.51 \tag{11}$$

式(11)中:$Y_{\mathrm{DHR-1}}$为DHR-1流变仪测得的剪切应力值,Pa;$X_{\text{自研}}$为自研流变仪测得的对应值,Pa。

回归方程相关系数R^2为0.968 1,表明两者之间具有较高的线性相关性,拟合效果较好,说明经校准方程的计算后测量结果能够较准确地反映标准流变仪的测试规律,将校准方程输入LabVIEW控制程序中,以便为后续在田间环境下开展便携式稳态流变参数测量提供可靠的数据修正。

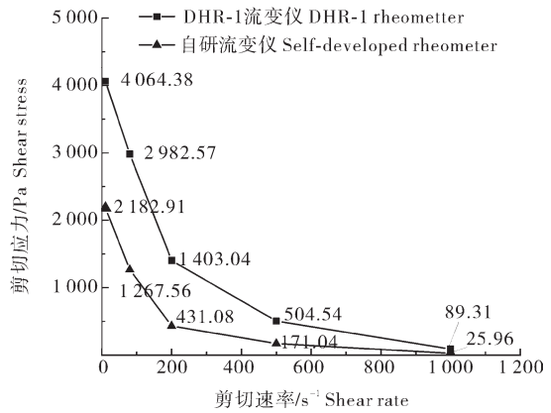


图10 2种仪器剪切应力随剪切速率变化趋势

Fig.10 Shear stress versus shear rate trends under different instruments

2.3 田间试验结果

稳态时间扫描模式下的试验结果如图11所示。在剪切初期，土壤应力迅速下降，随后减缓并在较长时间内趋于稳定，在0～20 s时，转子开始剪切，土壤内部结构被破坏，推测土壤内部絮凝体、杂质团絮等解体导致应力突降；20～120 s时，随着剪切持续进行，颗粒逐渐重新排列，形成新的接触与承载网络，使应力衰减速率降低并最终稳定。较高剪切速率下，应力水平整体更高、衰减更快，表明强剪切作用可加速结构的破坏与重构，使被测土壤更早进入稳态阶段，符合幂律流体的特征。

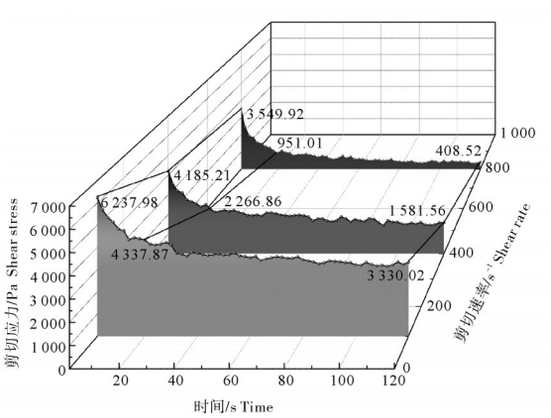
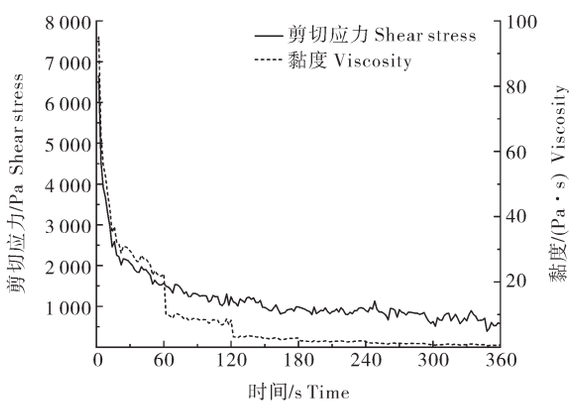


图11 稳态时间扫描模式下剪切应力试验结果

Fig.11 Variation curves of shear stress with time for field soil under different shear rates

此外，由于试验对象为田间土壤，内部含有秸秆碎片、根系残体及细小砂砾等杂质，这些杂质在剪切过程中产生嵌入、甩出及滑移等行为，易使应力曲线出现突变峰值，并在一定程度上提高初始应力和稳态平台值。硬质颗粒可能在局部形成临时“力链”增强短时承载，而纤维状杂质则因缠绕与拉拽作用增加能量耗散。总体而言，这些非均质因素虽会导致不同剪切速率下应力曲线的波动，但并不改变剪切应力随时间幂函数衰减的主要规律。

稳态速度扫描模式下的试验结果如图12所示，土壤在剪切初期（0～60 s内）表现出显著的结构扰动响应，剪切应力与黏度均出现峰值，随后迅速下降并趋于稳定，整体呈典型的幂函数衰减特征即为幂律流体，表明土壤内部絮凝体与杂质团絮在剪切初期被破坏，颗粒体系发生快速重排，力链结构逐步重构并进入稳态流动阶段。



0～60 s：剪切速率为70 s^{-1} The shear rate was 70 s^{-1}；60～120 s：剪切速率为150 s^{-1} The shear rate was 150 s^{-1}；120～180 s：剪切速率为350 s^{-1} The shear rate was 350 s^{-1}；180～240 s：剪切速率为500 s^{-1} The shear rate was 500 s^{-1}；240～300 s：剪切速率为750 s^{-1} The shear rate was 750 s^{-1}；300～360 s：剪切速率为900 s^{-1} The shear rate was 900 s^{-1}.

图12 稳态速率扫描模式下剪切应力及黏度试验结果

Fig.12 Steady-state shear stress test results under rate sweep mode

在不同剪切速率下，峰值应力与黏度随速率增大而升高，衰减速率亦相应加快，说明高剪切速率可加速土壤结构的破坏与重构过程，使土壤更快达到稳态。尤其在70 s^{-1}与150 s^{-1}阶段，土壤表现出典型的剪切稀化特性（图12）。曲线中局部“锯齿状”波动推测主要源于田间土壤中的杂质：秸秆碎片、根系残体及砂砾等杂质的嵌入、滑移及瞬时承载会引起局部应力突变，从而造成曲线的瞬态波动。

试验结果显示，无论在稳态速率扫描还是稳态时间扫描模式下，土壤均呈现由结构破坏到稳态重构的流变演化规律。在速率扫描模式中，随着剪切速率逐级升高，应力迅速下降后趋稳，反映出剪切作用削弱了颗粒间的黏结结构；在时间扫描模式中，应力随时间呈幂函数衰减并最终稳定，反映出土壤在持续剪切过程中内部结构迅速破坏、土壤颗粒、杂质

等重新排列并形成新的平衡结构的过程。

3　讨　论

本研究设计并研制了一种基于稳态剪切原理的便携式土壤稳态剪切测量仪。该仪器由平行板式转子测量夹具、动态扭矩传感器、伺服电机及工控屏组成，以工控屏为操作与控制核心，采集传感器信号并传输至LabVIEW上位机，实现稳态剪切模式下剪切应力、剪切速率及黏度的实时计算与可视化显示，为水田土壤稳态流变特性研究提供了可靠且可重复的试验手段。与传统实验室流变仪相比，该仪器在田间适用性、操作便捷性、流变参数修正具有明显优势，主要体现在以下3个方面：(1)具备田间土壤流变特性的快速测量能力。仪器采用平行板式转子结构设计，可直接在田间实际条件下对土壤样品进行稳态剪切试验，真实反映土体在自然环境下的流变特性，从而显著提高测量结果的代表性和工程适用性。(2)稳态剪切模式可实现多速率与多时间段的连续控制。仪器驱动系统采用高精度伺服电机，通过RS485总线与LabVIEW上位机实现闭环控制，可在稳态速率扫描与稳态时间扫描2种模式下灵活运行。(3)基于“3/4R法”修正原理，提高了测量精度与理论一致性。针对平行板结构在稳态剪切测试中存在的剪切速率沿半径方向分布不均问题，仪器在设计中引入了“3/4R法”修正理论，对黏度与剪切应力计算公式进行了修正，实现了测量原理的结果补偿。

依据TA Instruments公司DHR-1流变仪的稳态剪切测量模式对自研流变仪进行校准，获得校准方程：$Y_{\text{DHR-1}}=1.83X_{\text{自研}}+315.51$。本仪器与DHR-1流变仪测得的剪切应力随剪切速率变化规律一致，偏差较小，表明自研流变仪在传感、控制与信号采集环节均具有良好的稳定性与准确性，能够有效反映被测土壤的本构关系及稳态流变特征。

田间试验结果显示，在时间扫描与速率扫描2种模式下，尽管所测土壤中的杂质在剪切过程中会产生滑移、瞬时承载的行为，引起局部应力突变，使应力曲线产生“锯齿状”波动，但被测土壤整体表现出明显的应力松弛特征。高剪切速率下应力峰值更高、衰减更快，表明剪切速率的提升加速了土壤内部结构破坏与结构重排的过程。剪切应力与黏度在剪切初期迅速衰减并逐渐趋于稳定，整体呈典型的幂律流体变化规律。土壤黏度随剪切速率的升高逐渐减小，呈现典型的剪切稀化特性。

综上，所研制的便携式稳态剪切测量仪能够实现对水田土壤流变特性的快速、实时、准确的测定。田间试验结果可揭示水田土壤在受到触土部件剪切作用下由结构破坏到结构重排的变化规律。

参考文献 References

[1] 张青松，卢长康，孙煜，等. 基于文献计量学的农机触土部件研究进展与发展趋势[J]. 农业工程学报，2025，41(20)：30-43. ZHANG Q S，LU C K，SUN Y，et al. Research progress and development trends of agricultural machinery soilengaging components based on bibliometrics [J]. Transactions of the CSAE，2025，41(20)：30-43 (in Chinese with English abstract).

[2] 李心志，廖庆喜，袁华，等. 油菜基质块移栽机苗床带整备装置设计与试验[J]. 华中农业大学学报，2024，43(2)：215-226. LI X Z，LIAO Q X，YUAN H，et al. Design and test of seedbed belt preparation devicefor rapeseed substrate block transplanter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2024，43(2)：215-226(in Chinese with English abstract).

[3] 梁磊，孙浩田，徐高明，等. 田间原位试验分析长期机械作业下稻麦轮作地块土壤入渗性能[J]. 农业工程学报，2023，39(7)：110-118. LIANG L，SUN H T，XU G M，et al. Soil infiltration of rice-wheat rotation field under long-term mechanical treatment based on field *in situ* experiments [J]. Transactions of the CSAE，2023，39(7)：110-118(in Chinese with English abstract).

[4] 王洪昌，丁凯权，夏经久，等. 基于坍落度试验的扰动饱和水田土壤离散元参数标定[J]. 农业机械学报，2024，55(S2)：222-230. WANG H C，DING K Q，XIA J J，et al. Calibration of disturbed-saturated paddy soil discrete element parameters based on slump test [J]. Transactions of the CSAM，2024，55(S2)：222-230(in Chinese with English abstract).

[5] 袁鹏丽，覃佳宇，周雨茜，等. 旱改水型耕地红壤团聚体稳定性及影响因素研究[J]. 华中农业大学学报，2025，44(4)：47-57. YUAN P L，QIN J Y，ZHOU Y Q，et al. Stability and affecting factors of red soil agglomeratesin dryland converted paddy fields [J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2025，44(4)：47-57(in Chinese with English abstract).

[6] LIU G Y，XIA J F，ZHENG K，et al. Effects of moisture content and tillage methods on creep properties of paddy soil [J/OL]. PLoS One，2021，16(6)：e0253623 [2025-10-25]. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253623.

[7] 缪栋杰，宋丙辉，宋玉鹏，等. 基于流变仪测试海底浅表层软黏土不排水强度研究[J]. 海洋工程，2022，40(6)：97-104. MIAO D J，SONG B H，SONG Y P，et al. Testing the undrained shear strength of shallow submarine soft clay by rheom-

eter[J]. The ocean engineering, 2022, 40(6): 97-104(in Chinese with English abstract).

[8] 郭兴森,年廷凯,范宁,等.低温环境下南海海底泥流的流变试验及模型[J].岩土工程学报,2019,41(1):161-167.GUO X S, NIAN T K, FAN N, et al. Rheological tests and model for submarine mud flows in South China Sea under low temperatures [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019,41(1):161-167(in Chinese with English abstract).

[9] 展小云,郭明航,赵军,等.径流泥沙实时自动监测仪的研制[J].农业工程学报,2017,33(15):112-118.ZHAN X Y, GUO M H, ZHAO J, et al. Development of real-time and automatic measuring equipment for runoff and sediment[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 112-118(in Chinese with English abstract).

[10] 张川,谢祥荣,段青松,等.木纤维重构红壤下根系特征对根土复合体抗剪特性的影响[J].农业工程学报,2024,40(4):138-146.ZHANG C, XIE X R, DUAN Q S, et al. Effects of root characteristics on the shear characteristics of root-soil complex in wood fiber reconstructed red soil[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 138-146(in Chinese with English abstract).

[11] 杨明.水田土壤剪切强度测量仪的设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2016.YANG M. Design and experiment of cross plate paddy soil shear strength measuring instrument[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016(in Chinese with English abstract).

[12] 陈子文,姚宇熙,张海腾,等.田间土壤自动采样与参数实时检测装置设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(6):20-30. CHEN Z W, YAO Y X, ZHANG H T, et al. Design and experiment of an automatic soil sampling and real-time parameter detection device for field soils [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(6): 20-30(in Chinese with English abstract).

[13] 孟庆琳,屈福政,李守巨.土体旋转流变仪开发与土压平衡盾构改性土体塑性流动特性实验[J].岩土工程学报,2011,33(10):1642-1648.MENG Q L, QU F Z, LI S J. Development of soil rotational rheometer and experiment on plastic flow characteristics of conditioned soil in earth pressure balance shield[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(10): 1642-1648(in Chinese with English abstract).

[14] 姬长英,赵池航.动载式水田土壤流变仪的研制[J].农业机械学报,2004,35(2):88-91.JI C Y, ZHAO C H. Development of rheometer for paddy soils under dynamic loading[J]. Transactions of the CSAM, 2004, 35(2): 88-91(in Chinese with English abstract).

[15] YANG K, LIU Z W, WANG J, et al. Stress bifurcation in large amplitude oscillatory shear of yield stress fluids[J]. Journal of rheology, 2018, 62(1): 89-106.

[16] MEZGER T G. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers [M]. Hanover: Vincentz Network, 2020.

[17] KIM J H, YIM H J, FERRON R D. *In situ* measurement of the rheological properties and agglomeration on cementitious pastes[J]. Journal of rheology, 2016, 60(4): 695-704.

[18] JOSEPH P G. Dynamical systems-based soil mechanics[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.

[19] 董珈皓.磁性液体触变性机理和测量分析研究[D].北京:北京交通大学,2024.DONG J H. Study on thixotropic mechanism and measurement analysis of magnetic fluid[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024(in Chinese with English abstract).

[20] German Institute for Standardization. DIN 53019-3—2008 Viscometry: measurement of viscosities and flow curves by means of rotational viscometers - Part 3: errors of measurement and corrections [S]. Berlin: German Society for Standardization Press, 2008.

[21] COUSSOT P. Rheophysics: matter in all its states[M]. Cham: Springer International Publishing, 2014.

[22] SOUZA MENDES P R, ALICKE A A, THOMPSON R L. Parallel-plate geometry correction for transient rheometric experiments[J]. Applied rheology, 2014, 24: 1-10.

[23] ROUSSEL N. Understanding the rheology of concrete [M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2013.

[24] HAIST M, LINK J, NICIA D, et al. Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries [J/OL]. Materials and structures, 2020, 53(4): 92[2025-10-25]. https://doi.org/10.1617/s11527-020-01477-w.

[25] GIESEKUS H, LANGER G. Die Bestimmung der wahren Fließkurven nicht-newtonscher Flüssigkeiten und plastischer Stoffe mit der Methode der repräsentativen Viskosität[J]. Rheologica acta, 1977, 16(1): 1-22.

Design and experiment of a portable field steady-state rheometer of soil

ZHANG Guozhong, XIA Jingjiu, DAI Sheng, HUANG Enlin,
JI Ruijie, CAO Yongkang, WANG Hongchang

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract　A portable steady-state rheometer of soil was designed based on the steady shear principle to achieve the portable, rapid, and accurate measurement of rheological properties of paddy soil. The instrument consisted of a parallel-plate rotor measuring fixture, a dynamic torque sensor, a servo motor, and an industrial control panel. A modified formula based on the 3/4*R* correction principle was derived to correct the non-uniform shear field in the parallel-plate configuration, allowing the measurement of the apparent bulk viscosity of the soil tested. LabVIEW platform was used to develop an upper-computer system to obtain and process data, and achieve two testing modes including steady-state rate sweep and steady-state time sweep. The results of comparative calibration test with laboratory rheometer under the same conditions of shear showed that the designed rheometer had good stability and accuracy in sensing, control, and signal acquisition, and can effectively reflect the constitutive relationship and steady-state rheological characteristics of the soil tested. The results of field test showed that the stress of shear decreased in a power function form with the increase of shear time and gradually approached a stable value under the mode of steady-state time sweep, reflecting the structural breakdown and rearrangement process of soil under continuous shear. The stress of shear initially decreased rapidly with the increase of shear rate and then tended to stabilize under the mode of steady-state rate sweep. The soil exhibited typical characteristics of shear-thinning at shear rate of 70 s^{-1} and 150 s^{-1}. It will provide a reliable and repeatable experimental approach for investigating the steady-state rheological characteristics of paddy soil.

Keywords　soil; steady-state shear; portable measurement; LabVIEW; stress of shear

（责任编辑：陆文昌）