doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.024

基于 EDEM 的茶园土壤-有机肥混料离散元模型构建与试验

郇晓龙[1,2]　冯猛超[1]　武传宇[1,2]　贾江鸣[1,2]　陈建能[1,2]

（1.浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2.浙江省全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018）

摘要：为提高茶园土壤-有机肥混料的离散元模型仿真精度，以茶园土壤与有机肥为研究对象，通过物理试验与仿真模拟相结合的方法进行参数标定。通过斜面法、滚动摩擦试验及碰撞恢复系数测定，获取土壤与有机肥的物理参数及接触参数，并基于圆筒提升法实测混料堆积角。利用 Plackett－Burman 试验筛选出显著影响参数，结合最陡爬坡试验确定优化区间，通过 Box－Behnken 响应面法建立二次回归模型，获得最优参数组合：土壤-有机肥恢复系数为 0.35、有机肥-有机肥滚动摩擦因数为 0.115、有机肥-钢板碰撞恢复系数为 0.606。同时通过含水率试验分析明确了模型含水率的适用区间（5%～10%）。验证试验表明，仿真堆积角为 24.49°，与实际值相对误差为 1.65%。搭建茶园中耕施肥机样机，进行田间和仿真旋耕施肥试验，得到不同旋耕转速（150、200、250、300 r/min）条件下，田间试验和仿真试验覆土率的相对误差分别为 6.21%、4.52%、7.13%、7.72%，仿真试验与田间试验的土壤-有机肥分布情况相一致，验证了土壤-有机肥混料离散元模型和接触参数的准确性。

关键词：茶园；土壤-有机肥混料；离散元模型；参数标定；田间试验

中图分类号：S224.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)12-0267-12　　**OSID**：

Construction and Experiment of Discrete Element Model for Tea Garden Soil－Organic Fertilizer Mixture Based on EDEM

HUAN Xiaolong[1,2]　FENG Mengchao[1]　WU Chuanyu[1,2]　JIA Jiangming[1,2]　CHEN Jianneng[1,2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Zhejiang Transplanting Equipment Technology*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Aiming to improve the simulation accuracy of the discrete element model for tea garden soil－organic fertilizer mixture, focusing on the combination of physical experiments and simulation to calibrate the parameters of tea garden soil and organic fertilizer, by using the slope method, rolling friction test, and coefficient of restitution measurement, the physical and contact parameters of soil and organic fertilizer were obtained, and the mixing angle was measured based on the cylindrical lifting method. The Plackett－Burman experiment was used to screen for significant influencing parameters, and the optimization interval was determined by combining the steepest slope test. A quadratic regression model was established by using the Box－Behnken response surface method to obtain the optimal parameter combination: soil－organic fertilizer recovery coefficient of 0.35, organic fertilizer rolling friction factor of 0.115, and organic fertilizer steel recovery coefficient of 0.606. At the same time, the applicable range of moisture content for the model (5%～10%) was clarified through experimental analysis. The verification test showed that the simulated stacking angle was 24.49°, with a relative error of 1.65% compared with the actual value. A prototype of a tea garden tillage and fertilization machine was built, field rotary tillage and fertilization experiments were conducted, and rotary tillage and fertilization experiments were simulated. The relative errors of soil coverage rate in field experiments and simulation experiments at different rotary tillage speeds (150 r/min, 200 r/min, 250 r/min, and 300 r/min) were

收稿日期：2025－05－15　修回日期：2025－06－24

基金项目：国家自然科学基金项目(32301715)、财政部和农业农村部:国家茶叶产业技术体系项目(CARS－19)、浙江省农机研发推广一体化项目和浙江理工大学科研业务费专项资金项目(24242211－Y)

作者简介：郇晓龙(1995—)，男，助理研究员，博士，主要从事现代农业机械设计与试验研究，E-mail：huanxl@zstu.edu.cn

通信作者：陈建能(1972—)，男，教授，博士，主要从事农业装备及其智能化研究，E-mail：jiannengchen@zstu.edu.cn

6.21%, 4.52%, 7.13%, and 7.72%, respectively. The soil-organic fertilizer distribution in simulation experiments was consistent with that in field experiments, verifying the accuracy of the soil-organic fertilizer mixture discrete element model and contact parameters.

Key words: tea garden; soil-organic fertilizer mixture; discrete element model; parameter calibration; field experiment

0 引言

茶树作为一种多年生经济作物,其生长和发育需要大量的养分支持。施肥是茶园管理中不可或缺的重要环节,其对提高茶叶产量、改善茶叶品质、提升土壤肥力以及促进茶树健康生长具有重要意义[1]。茶园施肥采用基肥与追肥相结合的方式,通过沟施、撒施等方法,确保茶树在不同生长时期获得充足养分。随着我国农村劳动力人口越来越紧缺,茶园人工施肥,特别是开沟施肥,越来越困难。相比人工施肥,机械施肥的作业质量普遍不高,其中很重要的一个原因是其施肥过程中土壤和有机肥互作关系不清晰。因此,为进一步研究土壤和有机肥的接触参数,有必要建立土壤-有机肥混料的相互作用模型。

在研究土壤与其他物料颗粒之间互作关系的仿真领域中,离散元法得到了广泛应用。在离散元仿真过程中,模型参数的设置对仿真结果的准确性具有重要影响[2-3]。离散元法不仅可以预测颗粒的运动行为[4-5],还可以模拟颗粒的堆积过程,并有效评估不同颗粒参数和颗粒接触模型的适用性[6]。近年来,在农业工程领域,国内外已有众多学者利用离散元仿真法对物质材料颗粒方面进行参数标定的研究。SHAIKH 等[7]使用离散元方法模拟不同含水率下单根履带板与黏土壤地形的相互作用,采用 Hertz-Mindlin 接触模型对各含水率土壤的参数进行标定,并进行了土槽试验以验证仿真的准确性。刘瑞等[8]建立量化描述散体颗粒的运动学方程,分析确定了包衣玉米种子主要接触参数并进行标定。WANG 等[9]采用 Hertz-Mindlin 模型对小麦粉碎过程中接触参数进行标定,随后以小麦籽粒黏结模型的临界载荷为响应值,生成临界载荷的回归方程。将标定参数代入 EDEM 模型进行计算,计算值与观测值相对误差为 1.6%。张胜伟等[10]利用黏结模型并采用自由落体碰撞、斜面滑动法、斜面滚动法对绿豆种子与接触材料间的参数进行了标定,通过排种试验验证表明标定结果可为绿豆精密排种装置的设计与仿真优化提供理论参考。ZENG 等[11]基于 Hertz Mindlin with Bonding V2 模型建立了包衣棉籽与土壤压缩的仿真模型,以峰值压缩力为响应值,采用物理试验与仿真试验相结合的方法,对包衣棉籽与土壤仿真模型的接触参数进行标定。

现有研究主要聚焦于单一均质物料(如土壤、种子、肥料)与作业机具的接触参数标定。然而,茶园中耕施肥作业的核心对象是“土壤-有机肥混料”这一非均质双颗粒体系。该体系具有显著的独特性与复杂性:土壤颗粒与有机肥颗粒在物理和力学性质上存在显著的组分异质性,使得在旋耕等动态机械作用下,2 种颗粒间不仅会产生颗粒-颗粒的复杂碰撞、摩擦、挤压行为,还会形成颗粒-机具的强相互作用,而这些接触行为的相互作用共同决定了混料的流动、混合与分布。同时混料中土壤有效覆盖有机肥为理想状态的目标导向性,高度依赖于 2 种颗粒在机械扰动下的相对运动轨迹和空间配置关系。现有针对单一物料的标定方法难以直接迁移并准确表征这种特定目标下的双组分体系互作机理。

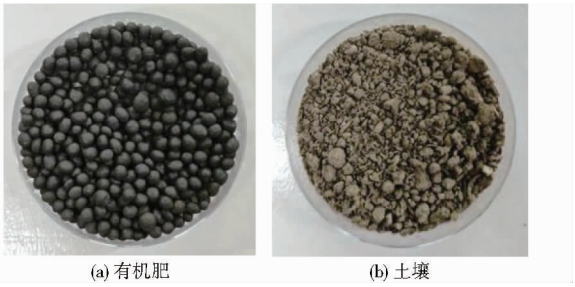
因此,针对单一物料研究的局限性,以“茶园土壤-有机肥混料”这一具有明确农艺目标的非均质双颗粒体系为研究对象,在现有研究方法的基础上,本文分别精细化测定有机肥和土壤的基本物理参数及其相互之间、与钢材之间的接触参数(静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数)。进而,利用离散元模拟软件(Discrete element method,EDEM),以混料堆积角为关键宏观响应指标,采用 Plackett-Burman Design 筛选显著影响混料行为的接触参数,通过最陡爬坡试验确定优化区间,并运用 Box-Behnken 响应面法精确标定土壤-有机肥间的最优接触参数组合。最后,通过田间旋耕施肥试验验证所建立模型及标定参数在模拟实际复杂作业过程中的准确性,为应用离散元法深入揭示茶园施肥过程中土壤与有机肥的动态互作机理,并为优化施肥机具设计提供理论基础和参数支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文研究对象为土壤-有机肥混料。其中有机肥为山东史丹利化肥有限公司的颗粒有机肥。所选颗粒有机肥外观呈规则或不规则颗粒状,其粒径分布范围及物理力学特性代表了当前茶园机械化施肥常用肥料的典型特征(图 1a)。土壤采集自浙江省

绍兴市御茶村核心茶园区域，该区域是典型的亚热带丘陵茶园，土壤类型为黄壤，是长江中下游茶区广泛分布的代表性土壤类型之一（图 1b）。采样时，在选定区域内选取 3 个具有代表性的地块（分别位于坡顶、坡中、坡底），每个地块按“S”形路线多点（5 ~ 7 点）采集 0 ~ 20 cm 耕作层土壤（此为茶树根系主要分布和施肥影响层）。采集的土壤样品经自然风干、去除石块和明显植物残体后，混合均匀备用。文献[12]表明，该区域茶园土壤的理化性质在本地区域内具有较好的代表性。虽然有机肥的含水率未被纳入离散元模型的标定参数体系，但该参数对肥料力学特性具有显著影响。具体而言，不同含水率的有机肥在贮存过程中会呈现差异性结块倾向，其施用时的流动特性与土壤接触力学行为也会发生相应改变，直接影响有机肥的贮存稳定性和田间施用效果。



(a) 有机肥　(b) 土壤

图 1　样品实物图

Fig. 1　Sample physical pictures

本试验通过烘干法[13]测定土壤和有机肥含水率。将土壤和有机肥样品分别放进培养皿中，并将其放置于恒温干燥箱中，设置干燥温度为 105℃，干燥至恒质量。干燥至恒质量后，称量样品并记录。含水率 ω 的计算公式为

$$\omega = (\omega_1 - \omega_2)/(\omega_1 - \omega_0) \times 100\% \tag{1}$$

式中　ω_1——烘干前样品与培养皿的质量，g

ω_2——烘干后样品与培养皿的质量，g

ω_0——恒质量后培养皿的质量，g

最后计算得土壤含水率为 19.87%，有机肥含水率为 6.12%。

1.2　试验材料物理参数

1.2.1　密度

采用排水法对颗粒有机肥密度进行测量。用电子天平（精度为 0.1 mg）称取 20 g 有机肥，将其放入盛有水的量筒（分度值 1 mL，量程 50 mL）中，量筒内排液体积即为加入的有机肥体积。有机肥密度计算式为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2}$$

式中　ρ——样品密度，g/cm^3

m——样品质量，g

V——排液体积，cm^3

重复 10 次试验取平均值，最终得到有机肥密度为 1.5 g/cm^3。

土壤密度参考文献[14]，采用环刀法[15]进行测量。利用环刀（容积 200 cm^3）采集土壤样品后称量，根据式（2）计算土壤密度，重复 10 次试验后得到土壤平均密度约为 2.6 g/cm^3。

1.2.2　剪切模量和泊松比

由于土壤颗粒尺寸较小，较难测得其剪切模量与泊松比，因此参照文献[16 - 20]，确定土壤泊松比与剪切模量分别为 0.3 和 5×10^7 Pa。有机肥剪切模量是指有机肥抵抗剪切应变的能力。本文在预试验的基础上参照文献[21 - 22]，在剪切模量实验室进行测定，试验装置如图 2 所示。剪切模量计算式为

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{3}$$

式中　G——剪切模量，Pa

τ——剪切应力，Pa

γ——剪切应变

通过测得有机肥剪切应力和应变，计算得到有机肥剪切模量为 1.2×10^6 Pa，泊松比为 0.25。

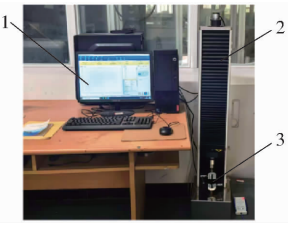


图 2　剪切模量测量试验装置

Fig. 2　Shear modulus measurement test device

1. 计算机　2. 试验装置　3. 待测样品

1.3　物理试验

通过斜面法[23]测量物料-钢板间的静摩擦因数和物料-物料间的静摩擦因数，通过斜面滚动法[23]测量物料-钢板间的滚动摩擦因数、物料-物料间的滚动摩擦因数，通过自由落体法[24]测得碰撞恢复系数。

1.3.1　静摩擦因数

静摩擦因数是物料所受最大静摩擦力与法向正压力的比值，能够很好地表达物料与接触固体表面的摩擦性质[25]。静摩擦因数试验装置如图 3 所示，测量物料与钢板间的静摩擦因数时，将待测样品和角度测量仪放置在钢板（300 mm × 300 mm × 2 mm）上。由于有机肥颗粒为球体，为防止其发生滚动，降低试验误差，用细针将其穿成一排竖直摆放。开始试验时，钢板水平放置，初始角度为 0°，通过拉绳缓

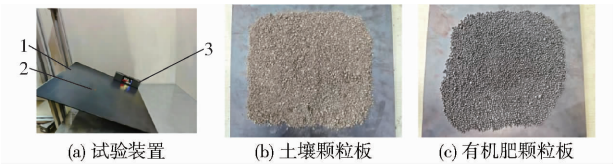
慢提升倾斜板一侧,使钢板倾斜角逐渐变大,当待测样品开始有滑动趋势时停止提升,此时记录角度测量仪读数。静摩擦因数计算式为

$$\mu_1 = \tan\alpha \tag{4}$$

式中 μ_1——静摩擦因数

α——斜面与水平面夹角,(°)

为提高试验结果的准确性,重复 10 次试验取平均值,得到有机肥-钢板的静摩擦因数为 0.7。



(a) 试验装置 (b) 土壤颗粒板 (c) 有机肥颗粒板

图 3 静摩擦因数测量试验装置

Fig. 3 Static friction coefficient measurement test devices

1. 倾斜钢板 2. 待测样品 3. 角度测量仪

在测量有机肥与土壤之间的静摩擦因数时,分别制作土壤颗粒板与有机肥颗粒板,即将土壤和有机肥通过胶水固定在钢板上。试验时,先将钢板放于水平位置,将土壤颗粒板放置在钢板上,待测样品放置在土壤颗粒板上,重复上述操作,分别测得土壤-土壤静摩擦因数以及土壤-有机肥静摩擦因数。同理,将有机肥颗粒板放置在钢板上可以测得有机肥-有机肥间静摩擦因数。试验重复 5 次,测得土壤-土壤静摩擦因数为 0.68,土壤-有机肥静摩擦因数为 0.66,有机肥-有机肥间静摩擦因数为 0.65。

1.3.2 滚动摩擦因数

滚动摩擦因数指的是一个物体在另一个表面上滚动时所受到的摩擦阻力与法向力的比值。滚动摩擦因数试验装置由倾斜钢板、水平钢板、钢尺、角度测量仪和支架组成(图 4)。在预试验基础上,选取 $\alpha = 30°$时测试滚动摩擦因数。测试物料与钢板间滚动摩擦因数时,将待测样品放置于距离倾斜钢板底部 200 mm 位置上,以初速度为零向下自由滚动至停止,水平滚动距离为 d。根据能量守恒定律可得出滚动摩擦因数计算式为

$$f_k = \frac{L\sin\alpha}{L\cos\alpha + d} \tag{5}$$

式中 f_k——滚动摩擦因数

L——物料与倾斜钢板底部距离,mm

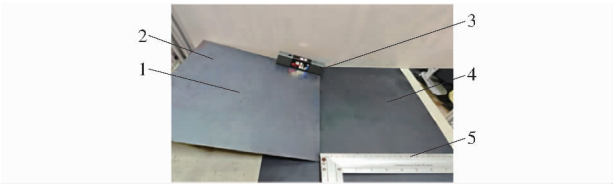


图 4 滚动摩擦因数测量试验装置

Fig. 4 Rolling friction coefficient measurement test device

1. 待测样品 2. 倾斜钢板 3. 角度测量仪 4. 水平钢板 5. 钢尺

重复 10 次试验取平均值,得到有机肥-钢板的滚动摩擦因数为 0.15。

同理,测试物料与物料间滚动摩擦因数时,将颗粒板放置于倾斜钢板与水平钢板上,重复上述操作,可测得土壤-有机肥滚动摩擦因数和有机肥-有机肥滚动摩擦因数。最终测得土壤-有机肥滚动摩擦因数和有机肥-有机肥滚动摩擦因数分别为 0.25 和 0.1。

1.3.3 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数通过碰撞弹跳试验进行测定[26],试验装置如图 5 所示。依次选用土壤颗粒板、有机肥颗粒板和钢板作为碰撞板,有机肥颗粒初始释放高度 H_1 分别选取 300、350、400 mm,采用高速摄像机记录待测样品接触碰撞板后的反弹高度 H_2,重复 10 次试验取均值,可得到有机肥-土壤间碰撞恢复系数、有机肥-有机肥间碰撞恢复系数和有机肥-钢板间碰撞恢复系数,计算公式为

$$e = \frac{v_y}{v} = \frac{\sqrt{2gH_1}}{\sqrt{2gH_2}} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \tag{6}$$

式中 e——碰撞恢复系数

v_y——物料碰触后径向速度,mm/s

v——物料碰触后速度,mm/s

g——重力加速度,m/s^2



图 5 碰撞恢复系数测试装置

Fig. 5 Coefficient of restitution measurement test device

1. 高速摄像机 2. 计算机 3. 直尺 4. 钢板

最后测得有机肥-土壤间碰撞恢复系数为 0.41,有机肥-有机肥间碰撞恢复系数为 0.59,有机肥-钢板间碰撞恢复系数为 0.55。

1.4 试验方法

采用圆筒提升法对土壤与有机肥混合物的实际堆积角进行测定。以所测得的堆积角为基准值,运用离散元模拟软件 EDEM 对该混料进行仿真模拟。为了确定对土壤-有机肥混合物离散元模拟具有显著影响的因素,利用试验设计软件 Design-Expert 设计 Plackett - Burman 试验。在确定显著影响因素后,通过最陡爬坡试验法对这些因素进行最优区间确定。在所确定的最优区间内,选取 3 个水平点,设计并执行 Box - Behnken 试验,以建立回归模型并确

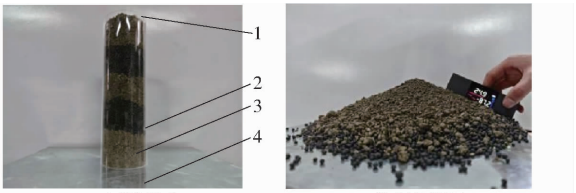
定最优参数组合。最终，在经过校准的参数设置下，进行土壤-有机肥混合物的仿真堆积角验证试验，以评估所标定参数的精确度。

1.5　试验方案

1.5.1　堆积角物理试验

堆积角是指大量物料自由下落所形成的锥体表面与水平面之间的夹角，堆积角测定是颗粒物料离散元参数标定的一种有效途径[27]。颗粒堆积角是反映散体颗粒群综合宏观特征的量，可以用于确定颗粒物料的流动性及摩擦因数，有助于认识堆积的微观力学机理和评估所采用模型的适用性[28]。

本试验采用圆筒提升法[29]对土壤-有机肥混料堆积角进行测定。试验装置如图 6 所示，由透明亚克力圆筒（内径 50 mm，高 250 mm）、钢板、土壤-有机肥混料组成。试验时，为体现土壤与有机肥间的互作形式，将 2 种物料分层布置，即在圆筒内依次装入土壤、有机肥颗粒，每层 50 mm，装满整个圆筒后，将圆筒以速度 500 mm/s 匀速提升，混料经圆筒底部堆积在底部钢板上。在土壤-有机肥混料静止后，使用电子水平尺测量其堆积角，堆积试验重复 5 次取平均值，得到土壤-有机肥混料的堆积角为 24.9°。



(a) 圆筒提升　　(b) 堆积角测量

图 6　堆积角物理试验

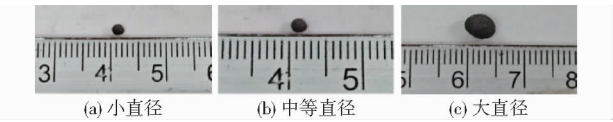
Fig. 6　Physical tests of repose angle

1. 圆筒　2. 有机肥　3. 土壤　4. 钢板

1.5.2　堆积角仿真试验

考虑合理简化模型，缩短计算耗时，本研究忽略有机肥不规则形状对滚动摩擦的影响，以基本球体设置肥料颗粒模型，根据有机肥颗粒尺寸建立肥料颗粒离散元模型。由于肥料颗粒大小不均匀，选取长轴尺寸作为肥料颗粒径长，并随机选取 100 粒肥料，对有机肥粒径分布范围进行统计，测量过程如图 7 所示。为更准确反映有机肥颗粒实际分布特征，模型中引入多粒径分组策略：将颗粒按粒径分为 0～1 mm、1～2 mm、2～3 mm 和 3 mm 以上 4 组，分别占比 3%、25%、67% 和 5%，各组采用不同的等效球体半径范围。通过 EDEM 的 Particle Size Distribution 功能生成符合实测概率分布的颗粒群，较原单一粒径模型更贴近物理实际。设置土壤的球形填充单元半径为 3 mm。

添加试验装置钢板的泊松比为 0.3，剪切模量为 7.9×10^{10} Pa，密度为 7 800 kg/m^3。应用 Solidworks 软件按照比例 1∶1 建立圆筒结构模型并导入 EDEM 中。参照文献[16]设置土壤其他接触参数和其他离散元模拟参数，如表 1 所示。



(a) 小直径　　(b) 中等直径　　(c) 大直径

图 7　有机肥直径测量

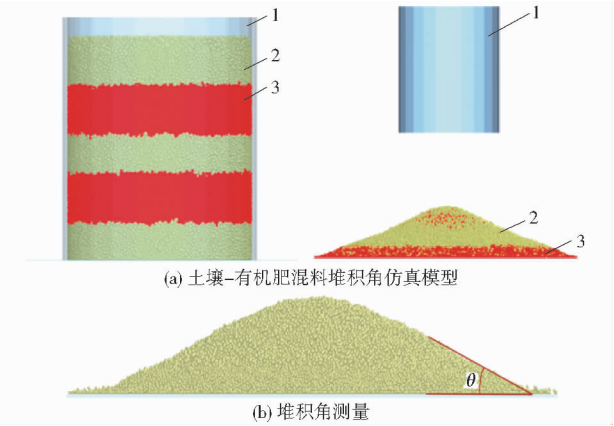
Fig. 7　Diameter size of organic fertilizer

表 1　土壤-有机肥混料堆积角仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters of soil organic fertilizer mixture stacking angle

项目	参数	数值
土壤-土壤	碰撞恢复系数	0.21
	静摩擦因数	0.68
	滚动摩擦因数	0.27
土壤-钢板	碰撞恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.31
	滚动摩擦因数	0.13
土壤-有机肥	碰撞恢复系数 X_1	0.2～0.6
	静摩擦因数 X_2	0.44～0.88
	滚动摩擦因数 X_3	0.1～0.5
有机肥-有机肥	碰撞恢复系数 X_4	0.4～0.8
	静摩擦因数 X_5	0.4～0.9
	滚动摩擦因数 X_6	0～0.2
有机肥-钢板	碰撞恢复系数 X_7	0.3～0.9
	静摩擦因数 X_8	0.5～0.9
	滚动摩擦因数 X_9	0～0.3
土壤-有机肥	JKR 表面能 X_{10}/(J·m^{-2})	0～0.04
有机肥-有机肥	JKR 表面能 X_{11}/(J·m^{-2})	0～0.03

在 EDEM 软件中，在圆筒内设置 5 个颗粒工厂，分别生成有机肥颗粒与土壤颗粒。其中距离圆筒底部 50、150、250 mm 生成土壤颗粒，距离圆筒底部 100、200 mm 处生成有机肥颗粒。从下往上依次生成颗粒，每个颗粒工厂生成时间为 0.5 s。其中每个土壤颗粒工厂生成土壤颗粒的总质量设置为 50 g，生成速度为 210 g/s；每个有机肥颗粒工厂生成有机肥颗粒的总质量设置为 40 g，生成速度为 180 g/s。仿真时间设为 6.0 s，仿真步长为 0.01 s，设定有机肥-土壤颗粒以自由落体运动从圆筒底部流出，重力加速度为 9.81 m/s^2。为保证有机肥和土壤颗粒能够充分混合，在颗粒生成完毕后，设置圆筒以速度 0.5 m/s 匀速提升[30]。运用 EDEM 后处理 Clipping 模块在颗粒堆垂面处设置 Clipping Planes Group 截面，利用 Tools 模块中量角器工具 Protractor，分别在颗粒堆截面底面、夹角和斜边上选定 3 个点，这 3 个点构成的角度作为堆积角 θ，堆积角测量以及仿真几何模型如图 8 所示。



(a) 土壤-有机肥混料堆积角仿真模型

(b) 堆积角测量

图 8 圆筒提升法仿真

Fig. 8 Simulation of cylinder lifting method

1. 圆筒 2. 土壤 3. 有机肥

1.6 含水率对堆积角的影响

为明确含水率(ω)对有机肥-土壤混料流动性的影响,设计了含水率梯度 5% ~15% 下的堆积角试验,含水率每 2.5% 测试一次。土壤含水率按 GB/T 50123—2019 标准调控,有机肥含水率调控通过喷雾加水并平衡 48 h(参照 GB/T 8576—2010)实现。每个含水率水平重复 5 次试验,结果如图 9 所示。堆积角 θ 与含水率 ω 的关系可拟合为

$$\theta=\begin{cases}0.78\omega+20.9 & (5\%\leqslant\omega\leqslant10\%)\\ 1.12\omega+17.5 & (10\%<\omega\leqslant15\%)\end{cases} \tag{7}$$

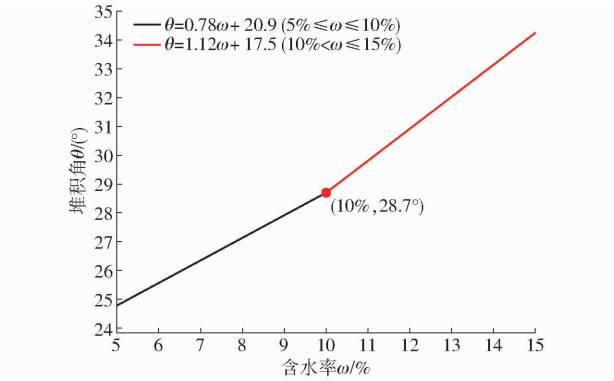


图 9 有机肥含水率对堆积角的敏感性

Fig. 9 Sensitivity of repose angle of organic fertilizer to moisture content

图 9 表明,当含水率小于等于 10% 时,含水率每增加 1 个百分点,堆积角平均增加 0.78°;当含水率大于 10% 时,堆积角增幅加剧(斜率 $k>1$),预示流动性显著下降。基于此,建议本模型在 $\omega\in[5\%,10\%]$ 范围内直接应用。

1.7 模型适用范围和局限性

本研究建立的土壤-有机肥混料 EDEM 模型及其标定参数,主要适用于模拟茶园中耕施肥作业中,在特定含水率范围(5% ~10%)内,土壤与颗粒有机肥混合物在机械扰动下的宏观流动与混合行为,特别是堆积形态和覆土率等关键宏观指标。同时该混料模型具有一定的局限性,具体体现在以下几点:①颗粒形状简化:模型将有机肥颗粒简化为球体,虽通过参数标定补偿了部分影响,但无法精确模拟不规则形状颗粒特有的滚动、互锁、定向排列等微观力学行为。这限制了模型在高精度模拟颗粒微观运动、局部受力或形状依赖过程(如精确排肥、颗粒破碎)中的应用。②接触模型:采用 Hertz - Mindlin(no slip)基础接触模型,未引入更复杂的黏性、塑性或黏结模型。在高含水率($\omega>10\%$)条件下,颗粒间液桥力或土壤粘塑性行为增强,当前模型可能无法准确表征其流动特性。对于土壤黏附、肥料结块或强塑性变形的场景,模型适用性受限。③模型尺度与边界:堆积角仿真采用有限尺寸圆筒,旋耕仿真采用有限尺寸箱体,存在边界效应(如壁面摩擦、侧向约束)。模型难以精确模拟无限大料堆或大规模田间连续作业中的远场流动行为。旋耕仿真中箱体边缘区域的流场和颗粒分布可能与实际无限边界情况存在差异。④参数动态性:标定参数(特别是与含水率、压实状态相关的参数)在动态、高速、高应变的旋耕过程中可能并非完全恒定。模型假设这些参数在仿真过程中保持不变,与实际可能存在动态差异。⑤非均质性表征:虽然引入了多粒径分组,但对土壤颗粒的处理相对简单(单一粒径球体)。实际土壤是包含孔隙、团聚体和水分的复杂多相介质,当前模型对土壤内部结构非均质性及其动态变化(如旋耕过程中的破碎、压实)的表征能力有限。⑥其他影响因素:模型未考虑环境因素(如温度、风化)、有机肥颗粒的长期物理化学变化(如降解、吸湿)或土壤中的生物活动(如根系)对混料力学行为的潜在影响。

2 试验结果与分析

2.1 Plackett - Burman 试验及显著性分析

为了探究不同影响因素与响应值之间的关联性,本研究采用 Design-Expert 软件来设计 Plackett - Burman 试验。该试验通过对比各影响因素在 2 个水平下的差异,从而评估这些因素的显著性。试验以有机肥-土壤混料堆积角为响应值,试验因素编码如表 2 所示,试验设计与结果如表 3 所示。其中 x_1 ~ x_{11} 为因素编码值,方差分析结果见表 4。从表 4 可看出,对有机肥-土壤混料堆积角具有显著性影响的前 3 个参数分别为 x_1、x_6 和 x_7。这 3 个参数的 P 值均小于 0.05,贡献度合计 88.12%。因此,结合参数显著性及贡献度,选取土壤-有机肥碰撞恢复系数数 x_1、有机肥-有机肥滚动摩擦因数 x_6、有机肥-钢

板碰撞恢复系数 x_7 进行后续最陡爬坡试验。

表 2　Plackett－Burman 试验因素与编码

Tab. 2　Plackett－Burman test parameters and codes

因素	编码		
	－1	0	1
X_1	0.2	0.4	0.6
X_2	0.44	0.66	0.88
X_3	0.1	0.3	0.5
X_4	0.4	0.6	0.8
X_5	0.40	0.65	0.90
X_6	0	0.1	0.2
X_7	0.3	0.6	0.9
X_8	0.5	0.7	0.9
X_9	0	0.15	0.30
X_{10}/(J·m^{-2})	0	0.02	0.04
X_{11}/(J·m^{-2})	0	0.015	0.030

表 3　Plackett－Burman 试验设计与结果

Tab. 3　Plackett－Burman test design and results

试验序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	堆积角/(°)
1	1	－1	1	1	－1	1	1	1	－1	－1	－1	23.64
2	1	1	－1	1	1	1	－1	－1	1	1	－1	24.08
3	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	20.86
4	－1	1	1	－1	1	1	1	－1	－1	－1	1	23.85
5	1	－1	－1	－1	1	－1	1	1	1	1	1	18.91
6	1	1	1	－1	－1	－1	1	－1	1	1	－1	17.91
7	－1	－1	1	－1	1	1	－1	1	1	1	－1	26.76
8	1	－1	1	1	1	－1	－1	－1	－1	－1	1	18.39
9	－1	－1	－1	1	－1	1	1	－1	1	1	1	24.84
10	－1	1	－1	1	1	－1	1	1	－1	－1	－1	18.63
11	1	1	－1	－1	－1	1	－1	1	－1	－1	1	22.45
12	－1	1	1	1	－1	－1	－1	1	1	1	1	23.01

表 4　方差分析结果

Tab. 4　ANOVA results

参数	效应	F	P	贡献度/%	显著性顺序
x_1	－2.09	854.54	0.021 8 *	13.96	2
x_2	－0.58	65.12	0.078 5	1.06	7
x_3	0.63	77.69	0.071 9	1.27	6
x_4	0.30	18.51	0.145 4	0.30	10
x_5	－0.35	23.62	0.129 2	0.38	9
x_6	4.65	4 212.92	0.009 8 **	68.83	1
x_7	－1.29	326.52	0.035 2 *	5.33	3
x_8	0.58	65.12	0.078 5	1.06	7
x_9	－0.89	155.96	0.050 9	2.54	5
x_{10}	1.28	319.83	0.035 6 *	5.22	4
x_{11}	－0.07	12.76	0.875 1	0.01	11

注：负号表示效应方向，* 表示差异显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），** 表示差异极显著（$P < 0.01$），下同。

Plackett－Burman 试验作为筛选设计，其方差分析基于非正交设计的线性回归模型，误差项通过合并非显著因素平方和的方法来估计，这一处理方式可能导致 F 值与 P 值的对应关系偏离传统正交试验的统计规律。本研究中显著因素的筛选结果通过后续最陡爬坡试验与 Box－Behnken 响应面试验进一步验证，确保了参数的可靠性[31-32]。

2.2　最陡爬坡试验设计

为确定显著性参数土壤-有机肥恢复系数 X_1、有机肥-有机肥滚动摩擦因数 X_6 和有机肥-钢板碰撞恢复系数 X_7 的最优值，将其余参数设置为中间水平值，设计最陡爬坡试验如表 5 所示。根据试验结果可以看出，堆积角随着 X_1、X_6、X_7 的增加逐渐增大，其相对误差呈先降低后增加的趋势。当 X_1、X_6、X_7 分别取 0.4、0.10、0.60 时，仿真堆积角与实际堆积角相对误差最小为 2.33%。在后续 Box－Behnken 试验中，将土壤-有机肥碰撞恢复系数 0.4、有机肥-有机肥滚动摩擦因数 0.10 和有机肥-钢板碰撞恢复系数 0.60 作为响应面试验设计中心水平，设计三因素三水平正交试验设计。

表 5　最陡爬坡试验设计与结果

Tab. 5　Test design and results of the steepest climb

序号	因素			堆积角/(°)	相对误差/%
	X_1	X_6	X_7		
1	0.2	0	0.30	19.43	21.97
2	0.3	0.05	0.45	21.64	13.09
3	0.4	0.10	0.60	24.32	2.33
4	0.5	0.15	0.75	26.82	7.71
5	0.6	0.20	0.90	29.08	16.79

2.3　Box－Behnken 试验设计

应用 Design-Expert 软件进行 Box－Behnken 试验设计。得到 X_1、X_6、X_7 与目标值堆积角的二次回归模型。试验因素编码如表 6 所示，试验设计与结果见表 7。

表 6　Box－Behnken 试验因素编码

Tab. 6　Box－Behnken test factors and coding

编码	因素		
	X_1	X_6	X_7
－1	0.35	0.07	0.55
0	0.40	0.10	0.60
1	0.45	0.13	0.65

2.3.1　回归模型分析

通过对试验结果进行多元回归拟合分析，获得土壤-有机肥混料堆积角与 3 个显著性参数的二阶回归模型，其回归方程为

$$Y = 0.371\,3x_1 + 1.95x_6 + 0.216\,3x_7 + 0.105x_1x_6 - 0.007\,5x_1x_7 - 0.175x_6x_7 + 0.162\,7x_1^2 + 0.280\,2x_6^2 + 0.307\,8x_7^2 + 24.09 \quad (8)$$

表 7 Box－Behnken 试验设计及结果

Tab. 7 Box－Behnken test design and results

试验序号	因素			堆积角
	x_1	x_6	x_7	Y/(°)
1	0	0	0	24.68
2	－1	1	0	26.07
3	0	－1	1	23.28
4	－1	0	1	24.27
5	0	－1	－1	22.25
6	0	1	1	26.76
7	0	1	－1	26.43
8	1	0	1	25.04
9	－1	0	－1	24.07
10	0	0	0	23.93
11	1	1	0	26.98
12	1	0	－1	24.87
13	0	0	0	24.22
14	0	0	0	23.64
15	－1	－1	0	22.30
16	1	－1	0	22.79
17	0	0	0	23.99

试验回归模型方差分析如表 8 所示。根据 Box－Behnken 响应面试验结果，回归模型极显著（$P < 0.0001$）；决定系数 $R^2 = 0.9781$，趋近于 1，表示回归方程拟合程度较好；土壤-有机肥碰撞恢复系数 X_1、有机肥-有机肥滚动摩擦因数 X_6 对堆积角影响显著（$P < 0.05$）；变异系数（CV）为 1.33%，表示该试验具有较高可靠性；精确度为 24.45，说明该试验精确度较高。

由图 10a 可知，因素 X_1、X_6 在所选水平范围内，堆积角随 X_1、X_6 的增大而增大。其中，随着 X_6 的增加，堆积角迅速增大，斜度较大；随着 X_1 的增加，堆积角缓慢增大，斜度较小。当 X_1、X_6 均处于较高水平时，堆积角的变化最为明显。由图 10b 可知，因素 X_1、X_7 交互作用对堆积角的影响并不明显，其响应面

表 8 回归模型方差分析

Tab. 8 Analysis of variance of regression model

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	33.07	9	3.67	34.74	<0.0001 **
x_1	1.10	1	1.10	10.42	0.0145 *
x_6	30.50	1	30.50	288.32	<0.0001 **
x_7	0.3741	1	0.3741	3.54	0.1021
x_1x_6	0.0441	1	0.0441	0.4169	0.5391
x_1x_7	0.0002	1	0.0002	0.0021	0.9645
x_6x_7	0.1225	1	0.1225	1.16	0.3176
x_1^2	0.1115	1	0.1115	1.05	0.3387
x_6^2	0.3307	1	0.3307	3.31	0.1204
x_7^2	0.3988	1	0.3988	3.77	0.0933
残差	0.7405	7	0.1058		
失拟项	0.1374	3	0.0458	0.3037	0.8225
误差	0.6031	4	0.1508		
总和	33.81	16			

几乎为一个水平面。由图 10c 可知，因素 X_6、X_7 在所选范围内，堆积角随 X_6 的增大而增大，堆积角变化较大；随 X_7 的增大先下降后上升，堆积角变化较小。总体来说，X_1、X_6、X_7 的交互作用对堆积角的影响并不显著。

2.3.2 最优参数组合

利用 Design-Expert 软件的优化模块，以堆积角相对误差的最小值为目标，对回归方程进行求解，分析响应曲面，对回归模型进行优化。目标及约束条件方程为

$$\begin{cases} \min\limits_{X_1,X_6,X_7} \Delta = \mathrm{abs}(Y - 24.9) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0.35 \leqslant X_1 \leqslant 0.45 \\ 0.07 \leqslant X_6 \leqslant 0.13 \\ 0.55 \leqslant X_7 \leqslant 0.65 \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

经数据处理，得到回归模型的最优参数组合为：土壤-有机肥碰撞恢复系数为 0.35，有机肥-有机肥滚动摩擦因数为 0.115，有机肥-钢板碰撞恢复系数

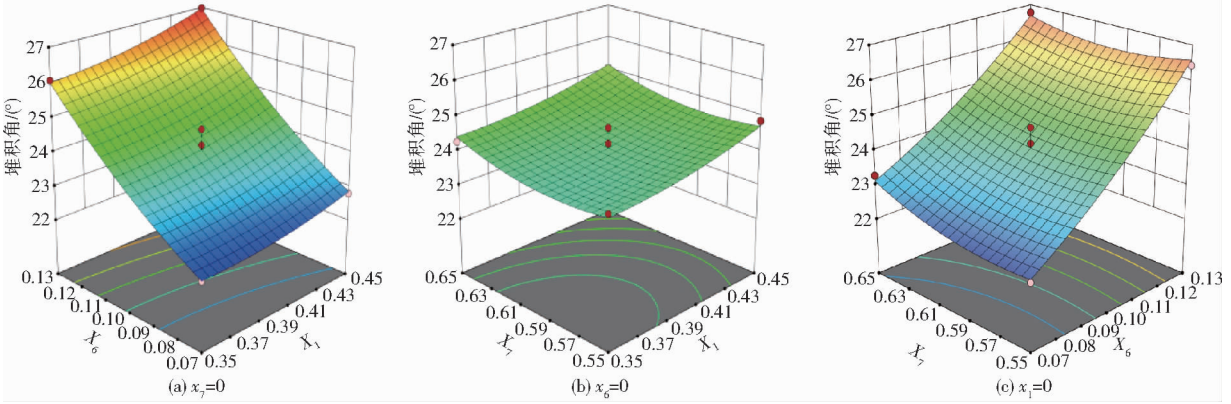


图 10 因素交互作用响应面

Fig. 10 Interaction factor response surface diagrams

为 0.606。将标定后的最优接触参数代入 EDEM 软件中，进行 5 次堆积角仿真试验，测得堆积角平均值为 24.49°，如图 11 所示。相对于物理试验得到的平均值(24.9°)误差为 1.65%，说明所得最优仿真接触参数组合与实际值基本一致，可用于后续的 EDEM 仿真试验。

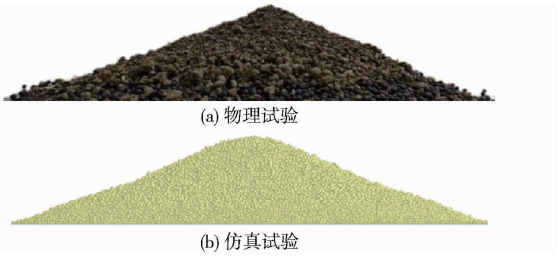


图 11　试验对比验证

Fig. 11　Test comparison verification

3　田间和仿真验证试验

3.1　田间试验

为进一步验证土壤-有机肥离散元模型和接触参数的可靠性，通过样机进行田间旋耕施肥试验，并利用建立的土壤-有机肥离散元模型和标定的接触参数进行 EDEM 仿真试验模拟旋耕施肥试验，在旋耕刀不同转速条件下(150、200、250、300 r/min)研究对比田间试验和仿真试验的旋耕施肥效果，分析覆土率 s 的实测值和仿真值并计算相对误差。覆土率 s 可以衡量旋耕施肥作业质量，较高的覆土率意味着肥料更好地被土壤覆盖，施肥效果较好，其计算公式为

$$s = a_1 / a_0 \times 100\% \tag{10}$$

式中　a_1——表面颗粒中土壤颗粒所占面积，m^2

a_0——表面颗粒总面积，m^2

田间试验所用茶园中耕施肥机如图 12 所示，采茶机后方装有肥料箱和旋耕装置。开始施肥作业时，肥料箱底部螺旋输送器开始运作，将肥料箱内有机肥向外输送，有机肥通过下料管散落在旋耕装置前方，同时采茶机向前运动，旋耕刀开始旋转，将有机肥旋耕进土壤中。开始试验时，为了与仿真过程相对应，先将有机肥撒施在垄间，再进行旋耕翻土。旋耕结束后，在旋耕路线的起点、中间及终点处随机选取 3 个 500 mm × 500 mm 地块，并用相机拍摄其表面颗粒图像。每次试验在茶园不同地块(坡顶、坡中、坡底)重复进行 3 次，最终结果取 3 次的平均值。施肥效果如图 13a 所示，旋耕效果如图 13b 所示，其中大部分有机肥被旋耕入土，少量有机肥裸露在土壤表面，未被土壤覆盖的有机肥在图 13b 中用圆圈突出展示。



图 12　茶园中耕施肥机

Fig. 12　Tea garden tillage and fertilization machine

1. 采茶机　2. 肥料箱　3. 螺旋输送器　4. 下料管　5. 旋耕刀

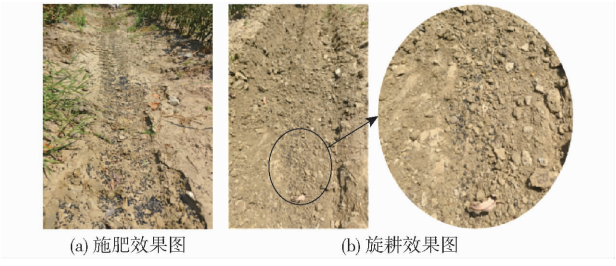


图 13　旋耕施肥试验效果

Fig. 13　Rotary tillage and fertilization test

3.2　仿真试验

根据茶园中耕施肥机的设计尺寸，利用 Solidworks 软件建立三维模型，为简化分析，仅保留旋耕装置，将旋耕刀和轴合并成一体，将模型导入 EDEM 软件中进行处理。所用旋耕刀如图 14 所示，该旋耕刀为组合旋耕刀，即最内侧一排为直刀，外侧两排为弯刀的直弯组合刀。为了防止缠草现象，在内侧直刀和电机之间加一除草盘，并在内外两刀座间加一挡草板，阻止杂草等缠入。刀具安装时通过销连接固定在电机轴上，安装完成后总宽度约 50 cm，耕深可达 15 cm。为模拟茶垄间的旋耕环境，设置 500 mm × 2 000 mm × 200 mm 的箱体，箱体内添加颗粒工厂，采用前文标定好的接触参数和离散元模型设置土壤和有机肥颗粒。先在底部生成约 150 mm 高的土壤颗粒，然后在土壤颗粒上方生成约 350 g 的有机肥颗粒，生成位置随机。生成的颗粒分布如图 15 所示，其中红色为有机肥颗粒，黄色为土壤颗粒。土壤和有机肥颗粒生成完成后，旋耕刀开始运动，设置旋耕刀耕深为 120 mm，前进速度为

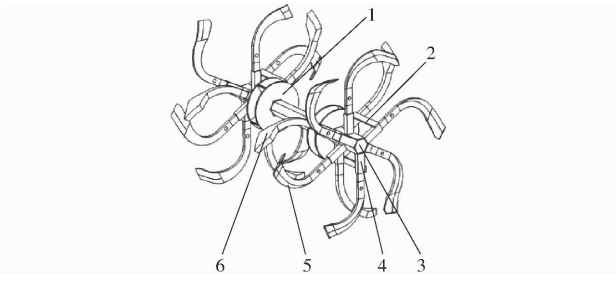


图 14　组合旋耕刀结构示意图

Fig. 14　Structure diagram of combined rotary tillage blade

1. 除草盘　2. 挡草板　3. 刀轴　4. 刀座　5. 弯刀　6. 直刀

1 m/s,转速分别设置为 150、200、250、300 r/min,旋耕仿真时间为 2 s,即旋耕完整段箱体颗粒。仿真结束后在后处理中获得旋耕结束后的土壤、有机肥颗粒图像。旋耕施肥仿真试验如图 16 所示。

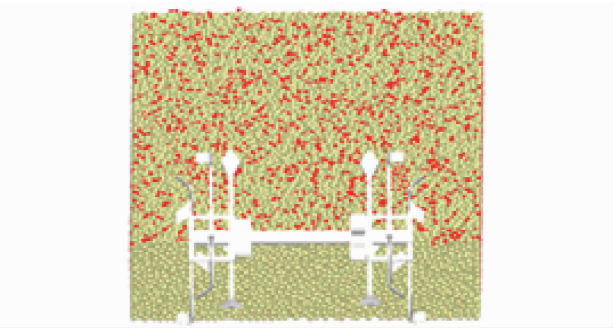


图 15 颗粒分布图

Fig. 15 Particle distribution

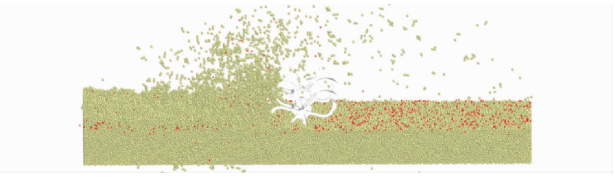
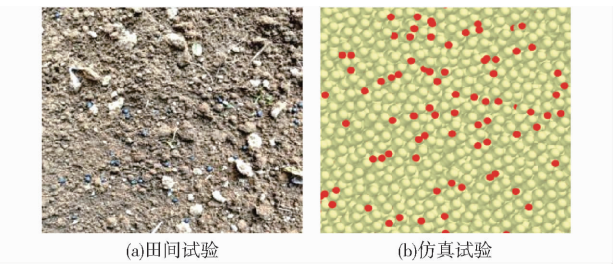


图 16 旋耕施肥仿真试验

Fig. 16 Simulation experiment of rotary tillage and fertilization

3.3 数据处理及误差分析

田间试验和仿真试验的覆土颗粒如图 17 所示,利用 Python 的 Pillow 库和 Numpy 库对其进行处理,通过阈值分割与形态学运算识别土壤与有机肥颗粒,计算覆土率的平均值与标准差。数据处理时剔除异常值,最终结果取 3 次重复的平均值。最后得到 4 种旋耕速度(150、200、250、300 r/min)下施肥旋耕的覆土率实测值和仿真值如表 9 所示,覆土率 s 的相对误差分别为 6.21%、4.52%、7.13% 和 7.72%。其中误差来源可能有以下几点:①土壤空间差异:茶园黄壤的黏粒含量在不同坡位差异达 10% ~15%,导致土壤-有机肥混料流动性波动。②测量方法误差:图像识别时有机肥与土壤颗粒的颜色阈值分割存在 ±2% 的识别误差。③设备操作误差:旋耕机前进速度波动((1.0 ±0.1) m/s)影响耕深一致性,影响最终试验结果。



(a)田间试验 (b)仿真试验

图 17 覆土颗粒图

Fig. 17 Pictures of covered soil particles

3.4 模型可靠性分析

对试验数据进行可靠性分析,采用 t 分布计算 95% 置信区间。表 9 中的计算结果表明各转速下覆土率的置信区间宽度为 1.23% ~1.56%,均小于实测值的 5%,说明试验数据具有较高可靠性。相对误差(4.52% ~7.72%)均在工程可接受范围内(<10%),且置信区间未包含零值,验证了仿真与田间结果的显著性差异。

表 9 验证试验方案与结果

Tab. 9 Scheme and results of verification experiment

转速/(r·min^{-1})	田间试验覆土率/%	仿真试验覆土率/%	相对误差/%	95% 置信区间(田间)/%
150	85.65 ±1.23	80.33	6.21	[84.42,86.88]
200	91.73 ±0.89	87.58	4.52	[90.84,92.62]
250	92.47 ±1.56	85.87	7.13	[90.91,94.03]
300	95.56 ±1.07	88.18	7.72	[94.50,96.62]

田间试验的 3 次重复表明,覆土率的变异系数(CV)为 1.02% ~1.68%,均小于 5%,满足农业试验精度要求。尽管存在土壤空间变异与测量误差,但仿真与田间结果的相对误差均小于 8%,且 95% 置信区间重叠度低。以上结果表明,在转速范围 150 ~300 r/min 内该土壤-有机肥混料离散元模型和接触参数可用于离散元仿真试验,为后续仿真模拟提供理论支撑。

4 结论

(1)通过搭建物理试验平台测定了颗粒有机肥物理参数:直径平均值约为 2.5 mm,密度为 1.5 g/cm^3,平均含水率为 6.12%。利用 EDEM 仿真软件,采用默认的 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,基于圆筒提升法形成的堆积角对土壤-有机肥混料进行离散元仿真,标定了土壤-有机肥之间的相关参数。

(2)通过 Placket - Burman Design 试验得到影响土壤-有机肥颗粒堆积角的显著参数:土壤-有机肥颗粒间碰撞恢复系数、有机肥颗粒间滚动摩擦因数、有机肥颗粒-钢板碰撞恢复系数。经过最陡爬坡试验优化显著性参数范围,后续通过 Box - Behnken Design 试验建立二次回归模型进行分析,由方差分析可知:土壤-有机肥颗粒间碰撞恢复系数与有机肥颗粒间滚动摩擦因数影响显著。

(3)以物理试验得到的堆积角为目标值,对二次回归方程优化,得到显著性参数最优值:土壤-有机肥颗粒碰撞恢复系数为 0.35、有机肥-有机肥颗粒间滚动摩擦因数为 0.115、有机肥颗粒-钢板碰撞恢复系数为 0.606。在最优参数组合下进行仿真堆积角试验,与实际物理堆积角相对误差为 1.65%。

(4)搭建茶园中耕施肥机样机，进行茶园旋耕施肥田间试验和参数标定后的仿真旋耕施肥试验，得到旋耕刀不同转速(150、200、250、300 r/min)条件下，田间试验和仿真试验覆土率的相对误差分别为 6.21%、4.52%、7.13%、7.72%。通过误差分析和模型可靠性分析，得到仿真与田间结果的相对误差均小于 8%，且 95% 置信区间重叠度低，表明模型在转速范围 150 ~ 300 r/min 内具有可靠的预测能力。仿真试验的土壤-有机肥颗粒分布情况与田间试验的分布情况相一致，验证了土壤-有机肥混料离散元模型和接触参数可用于离散元仿真试验。

参 考 文 献

[1] SHUI S N, CHANG K S. Contributions of technical progress to the tea economy—a quantitative assessment[R]. International Tea Workshop: Advances in Tea sciences and Technologies and the World Tea Economy, 1996.

[2] FANG M, YU Z, ZHANG W, et al. Friction coefficient calibration of com stalk particle mixtures using Placket - Burman design and response surface methodology[J]. Powder Technology, 2022, 396: 731 - 742.

[3] BARRIOS G K P, CARVALHO R M, KWADE A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. Powder Technology, 2013, 248: 84 - 93.

[4] FENG Y T, OWEN D R J. Diserete element modelling of large scale particle systems— Ⅰ: exact scaling laws[J]. Computationa Particle Mechanics, 2014, 1: 159 - 168.

[5] MILKEVYCH V, MUNKHOLM L J, CHEN Y, et al. Modelling approach for soil displacement in tillage using diserete elementmethod[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 60 - 71.

[6] 孙佳琪. 颗粒运动及混合过程的离散单元模拟研究[D]. 北京：中国石油大学(北京)，2020.
SUN Jiaqi. Study on discrete element simulation of the particle movement/mixing process[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020. (in Chinese)

[7] SHAIKH S A, LI Y, MA Z, et al. Discrete element method(DEM) simulation of single grouser shoe-soil interaction at varied moisture contents[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106538.

[8] 刘瑞，李衍军，刘忠军，等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报，2021，52(增刊)：1 - 8，18.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 1 - 8, 18. (in Chinese)

[9] WANG X, WU W, JIA H. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing[J]. Food Science Nutrition, 2023, 11(12): 7751 - 7764.

[10] 张胜伟，张瑞雨，陈天佑，等. 绿豆种子离散元仿真参数标定与排种试验[J]. 农业机械学报，2022，53(3)：71 - 79.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CHEN Tianyou, et al. Calibration of simulation parameters of mung bean seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 71 - 79. (in Chinese)

[11] ZENG F, DIAO H, CUI J, et al. Establishment and parameter calibration of a simulation model of coated cotton seeds and soil[J]. Processes, 2024, 12(3): 521.

[12] 黄沛琪，杜泳，吴雯倩，等. 基于 GIS 的茶叶自然地理条件分析——以绍兴市为例[J]. 地理科学研究，2021，10(3)：250 - 257.
HUANG Peiqi, DU Yong, WU Wenqian, et al. Analysis of natural geographical conditions of tea based on GIS: a case study of Shaoxing city[J]. Geographic Science Research, 2021, 10(3): 250 - 257. (in Chinese)

[13] 中国国家标准化管理委员会. 复混肥料中游离水含量的测定：GB/T8576—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2010.

[14] 宋占华，李浩，闫银发，等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(6)：21 - 33.
SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21 - 33. (in Chinese)

[15] 水利部南京水利科学研究院. 土工试验方法标准：GB/T 50123—2019[S]. 北京：中国计划出版社，2019.

[16] 戴飞，宋学锋，赵武云，等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报，2019，50(2)：49 - 56，77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49 - 56, 77. (in Chinese)

[17] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 140 - 153.

[18] 王宪良，胡红，王庆杰，等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报，2017，48(12)：78 - 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 - 85. (in Chinese)

[19] 方会敏，姬长英，AHMED Ali Tagar，等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报，2016，47(1)：60 - 67.

FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw – soil – rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 – 67. (in Chinese)

[20] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报,2016,47(9):62 – 72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 – 72. (in Chinese)

[21] 张建路,王鹏飞. 基于 EDEM 机施有机肥离散元模型参数标定[J]. 农机化研究,2023,45(9):122 – 128.
ZHANG Jianlu, WANG Pengfei. Calibration of discrete element model parameters of organic fertilizer application based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(9): 122 – 128. (in Chinese)

[22] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2018,34(18):21 – 27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21 – 27. (in Chinese)

[23] 张宏建,陈修波,李宏立,等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):80 – 90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 80 – 90. (in Chinese)

[24] 文恩杨,李玉华,牛子孺,等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究,2021,43(5):160 – 167.
WEN Enyang, LI Yuhua, NIU Ziru, et al. Parameters calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 160 – 167. (in Chinese)

[25] 余参参,段宏兵,蔡兴奎,等. 基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J]. 华中农业大学学报,2021,40(1):210 – 217.
YU Cancan, DUAN Hongbing, CAI Xingkui, et al. Discrete element simulation parameters-based measurement of materials for potato minituber[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 210 – 217. (in Chinese)

[26] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(5):125 – 135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 – 135, 142. (in Chinese)

[27] 王刚,王倩,薛忠,等. 基于离散元法的椰糠颗粒建模及仿真参数标定[J]. 热带作物学报,2021,42(9):2704 – 2710.
WANG Gang, WANG Qian, XUE Zhong, et al. Modeling and simulation parameters calibration of coconut coir particles based on DEM[J]. Journal of Tropical Crops, 2021, 42(9): 2704 – 2710. (in Chinese)

[28] 李艳洁,徐泳. 用离散元模拟颗粒堆积问题[J]. 农机化研究,2005(2):57 – 59.
LI Yanjie, XU Yong. Discrete element simulation on particle piling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(2): 57 – 59. (in Chinese)

[29] 于淼,周海宾,丁京涛,等. 基于 EDEM 的餐厨垃圾组成颗粒间接触参数标定[J]. 中国农业科技导报,2023,25(12):111 – 120.
YU Miao, ZHOU Haibin, DING Jingtao, et al. Calibration of interparticle contact parameters of kitchen waste composition based on EDEM[J]. China Agricultural Science and Technology Guide, 2023, 25(12): 111 – 120. (in Chinese)

[30] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等. 黑土区玉米秸秆–土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(10):100 – 108.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw – soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100 – 108. (in Chinese)

[31] MONTOMERY D C. Design and analysis of experiments[M]. Wiley USA, 2019.

[32] TANG J, ZHANG H. Screening designs in agricultural experiments[J]. Journal of Agricultural Science, 2018, 156(3): 435 – 448.