

不同含水率蚯蚓粪颗粒物料流动性研究

林嘉聪^{1,2}, 罗 帅^{1,2}, 袁巧霞^{1,2*}, 曹红亮¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 蚯蚓粪是有机固体废弃物经蚯蚓过腹处理后排出的特殊物料, 由于含水率高达 40%~60%的同时又能够保持散体细小颗粒的状态, 导致流动性参数难以通过常规测试手段得到。为给蚯蚓粪收集、分离、运输等不同阶段机械化作业提供有效的运动摩擦参数, 探究含水率变化对蚯蚓粪颗粒流动性参数的影响。研究通过堆积角试验与离散元仿真 (Discrete element method, DEM) 堆积角虚拟试验相结合的方法, 从数值上量化分析了基于牛粪转化后不同含水率 25%~65%蚯蚓粪物料的滚动摩擦参数与物料黏结能力。结果表明, 显著影响蚯蚓粪堆积角的因素为蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数, 蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数, 蚯蚓粪的 JKR 表面能 (Johnson Kendall Roberts surface energy)。随着含水率的增加, 蚯蚓粪-蚯蚓粪的滚动摩擦系数由 0.135 下降至 0.110, 蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数由 0.116 下降至 0.102, 两者呈现小幅度下降, 内摩擦角由 45.81°降至 26.10°, 而 JKR 表面能由 0.179 J/m² 增加至 0.345 J/m², 增幅显著。含水率低于 50%时, 随着含水率增加, 物料滚动摩擦系数减小, 内摩擦角减小, 一定程度上有利于物料滚动流动; 含水率超过 50%时, 由于表面能提高, 内聚力增大, 蚯蚓粪物料之间易发生物料黏结团聚, 一定程度上又会阻碍蚯蚓粪的翻滚运动。

关键词: 粪; 含水率; 蚯蚓粪; 摩擦系数; 流动性; 黏结性能; 离散元

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.027

中图分类号: S216; S3; S89

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-09-0221-07

林嘉聪, 罗 帅, 袁巧霞, 曹红亮. 不同含水率蚯蚓粪颗粒物料流动性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 221-227.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.027 <http://www.tcsae.org>

Lin Jiacong, Luo Shuai, Yuan Qiaoxia, Cao Hongliang. Flow properties of vermicompost particle with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 221-227.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.027 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

蚯蚓堆肥是目前处理农业生产废弃物无害化、减量化、资源化再利用的重要手段, 堆肥处理之后排出的号称“有机肥之王”的蚯蚓粪^[1-4]。由于蚯蚓粪在孔隙特性、养分特性、气水湿热协调方面具有的优良品质, 被广泛用于育苗基质、气体吸附剂、畜禽床垫料等方面。虽然近年来蚯蚓粪的应用研究大量开展, 并逐步成为科学家们研究的热点, 但大量的研究仍然集中于对蚯蚓粪化学组分、转化前后养分特性应用、微生物学指标^[5-12]等方面, 较少对蚯蚓粪物料的物理性能进行量化研究。

由于国内的蚯蚓堆肥发展水平比较低, 蚯蚓粪的收集、分离、运输等机械化是蚯蚓行业亟需解决的瓶颈问题之一^[13-14]。物料的流动性参数是实现蚯蚓粪机械化作业所需要的关键, 也是进行蚯蚓粪物料流动计算的基础, 需要量化获得。由于蚯蚓粪是经过蚯蚓过腹处理之后的小颗粒, 结构特殊、含水率高达 40%~60%, 但同时又保持大量的孔隙结构, 使得蚯蚓粪在高含水率的状态下又

呈现细小颗粒的散体状态, 导致了蚯蚓粪的流动性相关的参数较难以通过常规测试方法获取。

物料流动性参数^[15]是物料滚动流动过程的重要指标, 包括物料的内聚力、内摩擦角、接触面滚动摩擦系数, 常用堆积角试验进行研究。本研究中蚯蚓粪为高含水的散体小颗粒, 流动方式中主要以滚动流动为主, 针对流动参数难以获取的问题, 可以通过离散元方法 (discrete element method, DEM) 进行的“虚拟试验”标定物料参数。王国强、龚明^[16-17]阐述了通过离散元获取物料参数的方法, 通过计算机仿真模拟完成一些物料参数试验, 如堆积角试验、斜板试验等, 并不断的调整离散元参数, 将模拟出来的物料堆积角表现状态值和实际试验值验证, 若相一致, 则认为该参数值是符合实际情况的。韩燕龙^[18]等通过此方法探究了滚动摩擦系数对堆积特性的影响; 石林榕等^[19-21]用此方法获得了不同农田土壤的部分物理参数, 王云霞等^[22]用此离散元标定方法获得了排种器内玉米种子的部分参数, 表明此方法在散体物料虚拟仿真推导参数上具有一定效果。

目前实际生产中蚯蚓处理的有机固体废弃物主要有牛粪、猪粪、城市污泥等, 以牛粪为堆肥基料由于工艺技术较简单, 是蚯蚓堆肥首选物料。研究以基于牛粪为原料经蚯蚓处理后的得到的蚯蚓粪为研究对象, 进行蚯蚓粪直剪试验与蚯蚓粪堆积角 EDEM 仿真模拟, 通过 PB 筛选试验、爬坡试验、析因试验和真实试验标定的方法, 建立堆积角数学模型, 量化得到不同含水率蚯蚓粪流动

收稿日期: 2018-09-18 修订日期: 2019-04-25

基金项目: 中央高校基本业务科研经费 (2662016PY108); 公益性行业 (农业) 专项 (201303091); 湖北省自然科学基金 (2017CFB159)

作者简介: 林嘉聪, 博士生, 主要从事农业生物环境工程方面研究。

Email: linjiacong2015@hotmail.com

*通信作者: 袁巧霞, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业环境工程与生物质资源化利用方面研究。Email: qxyuan@mail.hzau.edu.cn

性相关的运动摩擦系数与黏结性能参数,综合分析含水率变化对蚯蚓粪颗粒流动性的影响,以期对蚯蚓粪收集、分离、运输等不同阶段机械化作业提供有效的流动性参数。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验供试材料为蚯蚓处理牛粪之后所转化成的蚯蚓粪,取自武汉东西湖蚯蚓养殖基地,蚯蚓粪直接从养殖基地现取样。目前蚯蚓粪用于基质、吸附剂等应用产品均为小颗粒状态,蚯蚓堆肥后期机械化应用的蚯蚓粪含水率绝大部分为40%~60%^[8],试验材料蚯蚓粪的机械组成分布为:>2.00 mm 4.11%, >1.00~2.00 mm 13.65%, >0.50~1.00 mm 12.73%, >0.25~0.50 mm 22.44%, >0.05~0.25 mm 6.92%, >0.02~0.05 mm 29.53%, <0.02 mm 10.22%。

蚯蚓粪原样放入5个600 mm×600 mm×300 mm的立方体塑料盒中,基于物料原本含水状态配置不同含水率25%~65%的蚯蚓粪样品。每次取样均用标准环刀(65 mm×φ120 mm)取中心样品。配置不同含水率蚯蚓粪方法如下

$$m_s = \frac{m_0}{1 + 0.01\omega_0} \times 0.01(\omega_1 - \omega_0) \quad (1)$$

式中 m_s 为配置物料的加水量, kg; m_0 为物料质量, kg; ω_0 为物料原本含水率, %; ω_1 为配置物料的目标含水率, %。

参考土壤基本测试方法^[23]、比重瓶法、环刀排水法、吸管法测试试验蚯蚓粪材料的基本性质见表1。

表1 不同含水率蚯蚓粪原料基本性质

Table 1 Basic properties of vermicompost under different moisture contents

组别 Group	含水率 Moisture content/%	容重 Unit weigh/ (g·cm ⁻³)	密度 Density/ (g·cm ⁻³)	总孔隙 Total porosity/%
A1	25.52±3.06	0.51		73
A2	33.12±3.00	0.55		72
A3	41.51±2.12	0.58	1.86±0.19	70
A4	50.22±3.01	0.59		71
A5	65.68±3.05	0.63		68

1.2 试验方法与试验设计

1.2.1 蚯蚓粪直剪试验

通过直剪试验能够获得物料的内摩擦角,内摩擦角是散体物料抗剪强度指标,可用于衡量物料内部颗粒克服自身粗糙表面阻力发生滚动流动、滑动的重要参数,反映物料的摩擦特性^[15]。蚯蚓粪为散体物料,按照散体力学理论^[15],将蚯蚓粪假设为连续介质模型,测量散粒体的内摩擦角,同时可以间接推算颗粒体的近似泊松比 ν 。直剪仪(南京土壤仪器厂有限公司)以 Coulomb 理论为基础,通过试验结果可以绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线。

根据莫尔理论有

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (2)$$

式中 σ 为正应力, Pa; τ_f 为剪切应力, Pa; c 为散粒体内

聚力, N/m²; φ 为内摩擦角, rad。

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0}, K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (3)$$

式中 K_0 为侧压力系数,无量纲,可以通过内摩擦角求得。

1.2.2 蚯蚓粪运动摩擦参数标定试验

在直径为600 mm的不锈钢圆盘上进行堆积角试验^[15],试验材料为自然堆积状态下不同含水率 A1、A2、A3、A4、A5 组蚯蚓粪。建立堆积试验 DEM 模型,如图1。试验标定选择 Hertz-Mindlin-JKR 模型^[24],此模型适用于具有一定含水率的潮湿物料,具有一定粘聚力的散体物料的运动模拟。建立相同的圆筒堆积角的试验仿真模型^[25],选用了颗粒平均直径为2.00 mm 球体模型。不锈钢的泊松比为0.30,剪切模量 7.90×10^{10} Pa,密度为 7.86×10^3 kg/m³,重力加速度为 9.81 m/s²,仿真步长为瑞利时间的22%,每隔0.01 s记录数据,仿真时间为4.00 s。

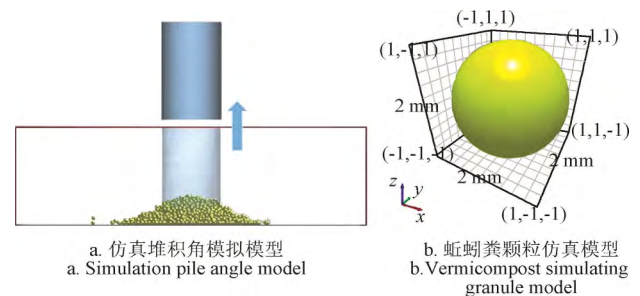


图1 离散元模拟仿真模型

Fig.1 Simulation model of discrete element

通过 Plackett-Burman (PB) 筛选试验,筛选出众多物理因素中影响蚯蚓粪堆积角的下落堆积运动过程的摩擦性能相关因素。其次,针对显著性因素进行最陡爬坡试验进一步快速找到合理范围值。最后,利用响应面析因试验设计(response surface methodology, RSM)^[26]建立的标定模型与真实试验比对求解蚯蚓粪的运动摩擦参数,试验设计与数据均通过 Minitab 和 Excel 软件处理。表2为PB筛选试验因素与水平。

表2 PB 筛选试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of Plackett-Burman experiment

参数 Parameters	低水平 Lowest level (-1)	中值 Average level (0)	高水平 Highest level (+1)
泊松比 Poisson ratio A	0.10	0.30	0.50
剪切模量 Shear modulus B /MPa	1.00	5.50	10.00
颗粒密度 Particle density C /(kg·m ⁻³)	1000	1750	2500
蚯蚓粪-蚯蚓粪碰撞恢复系数 Vermicompost-vermicompost collided restitution coefficient D	0.10	0.40	0.70
蚯蚓粪-蚯蚓粪静摩擦系数 Vermicompost-vermicompost static friction coefficient E	0.10	0.55	1.00
蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数 Vermicompost-vermicompost rolling friction coefficient F	0.05	0.30	0.55
蚯蚓粪-不锈钢碰撞恢复系数 Vermicompost-steel collided restitution coefficient G	0.10	0.40	0.70
蚯蚓粪-不锈钢静摩擦系数 Vermicompost-steel static friction coefficient H	0.10	0.50	0.90
蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数 Vermicompost-steel rolling friction coefficient J	0.05	0.275	0.50
JKR 表面能量 JKR surface energy K /(J·m ⁻²)	0.05	0.35	0.65

2 结果与分析

2.1 基于堆积角摩擦参数仿真标定与验证

通过 PB 试验，得到的试验结果与方差分析结果如表 3 和表 4 所示，从方差分析的结果可以看出，显著影响蚯蚓粪堆积角的因素为蚯蚓粪-蚯蚓粪之间的滚动摩擦系数，蚯蚓粪-不锈钢的滚动摩擦系数，蚯蚓粪的 JKR 表面能。

能。JKR 表面能是 DEM 离散元法中衡量颗粒接触表面黏结能量的数值指标^[15,24]，能够用于反映颗粒表面黏结性能强弱。从三者的分析结果可以看出，对堆积角影响程度的顺序为：蚯蚓粪 JKR 表面能>蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数>蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数。蚯蚓粪颗粒为近似圆球状颗粒，物料的流动方式以滚动运动为主，故流动运动过程与滚动摩擦系数、表面黏结性能有最直接的联系。

表 3 PB 筛选试验结果
Table 3 Pile angle result of Plackett-Burman design

序号 No.	泊松比 Poisson ratio	剪切模量 Shear modulus/MPa	颗粒密度 Particle density/(kg·m ⁻³)	蚯蚓粪-蚯蚓粪碰撞恢复系数 V-V collided restitution coefficient	蚯蚓粪-蚯蚓粪静摩擦系数 V-V static friction coefficient	蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数 V-V rolling friction coefficient	蚯蚓粪-不锈钢碰撞恢复系数 V-S collided restitution coefficient	蚯蚓粪-不锈钢静摩擦系数 V-S static friction coefficient	蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数 V-S rolling friction coefficient	JKR 表面能 JKR surface energy/(J·m ⁻²)	堆积角 Pile angle/(°)
1	0.10	1.00	1 000	0.70	0.10	0.55	0.10	0.90	0.50	0.65	85.59
2	0.50	10.0	1 000	0.70	1.00	0.05	0.10	0.10	0.05	0.65	54.13
3	0.50	1.00	1 000	0.10	0.10	0.55	0.10	0.90	0.05	0.65	60.02
4	0.10	1.00	1 000	0.10	0.10	0.05	0.10	0.10	0.05	0.05	16.01
5	0.50	1.00	2 500	0.10	1.00	0.55	0.70	0.90	0.05	0.05	28.11
6	0.10	1.00	2 500	0.10	1.00	0.05	0.70	0.90	0.50	0.65	73.44
7	0.50	1.00	2 500	0.70	1.00	0.55	0.10	0.10	0.50	0.65	80.02
8	0.10	10.0	1 000	0.70	1.00	0.55	0.70	0.10	0.05	0.65	84.14
9	0.50	1.00	2 500	0.70	0.10	0.05	0.10	0.10	0.50	0.05	23.01
10	0.10	10.0	2 500	0.10	0.10	0.05	0.10	0.90	0.05	0.65	69.15
11	0.10	1.00	2 500	0.70	0.10	0.55	0.70	0.10	0.05	0.05	37.71
12	0.10	10.0	1 000	0.70	0.10	0.55	0.70	0.90	0.50	0.05	44.83
13	0.10	10.0	2 500	0.10	1.00	0.55	0.10	0.10	0.05	0.05	44.51
14	0.10	10.0	2 500	0.70	1.00	0.05	0.10	0.90	0.50	0.05	25.41
15	0.50	1.00	1 000	0.70	1.00	0.05	0.70	0.90	0.05	0.05	16.04
16	0.10	1.00	1 000	0.10	1.00	0.05	0.70	0.10	0.50	0.65	82.19
17	0.30	5.50	1 750	0.40	0.55	0.3	0.40	0.50	0.275	0.35	78.75
18	0.50	10.0	1 000	0.10	1.00	0.55	0.10	0.90	0.50	0.05	54.84
19	0.50	10.0	1 000	0.10	0.10	0.05	0.70	0.10	0.50	0.05	25.37
20	0.50	10.0	2 500	0.10	0.10	0.55	0.70	0.10	0.50	0.65	86.03
21	0.50	10.0	2 500	0.70	0.10	0.05	0.70	0.90	0.05	0.65	80.22

注：表中 V 代表蚯蚓粪，S 代表不锈钢。
Note: V represents vermicompost, S represents steel in the table.

表 4 PB 筛选试验方差分析结果
Table 4 Analysis of variance of Plackett-Burman design

来源 Resources	自由度 Free degree	效应 Effect	Adj SS	Adj MS	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	11		12 170.30	1 106.39	13.13	<0.01
线性 Liner	10		11 564.90	1 156.49	13.73	<0.01
泊松比 Poisson ratio A	1	-5.52	152.30	152.30	1.81	0.21
剪切模量 Shear modulus B	1	6.65	221.00	221.05	2.62	0.14
颗粒密度 Particle density C	1	2.45	29.90	29.89	0.35	0.57
蚯蚓粪-蚯蚓粪碰撞恢复系数 V-V collided restitution coefficient D	1	-0.86	3.70	3.67	0.04	0.84
蚯蚓粪-蚯蚓粪静摩擦系数 V-V static friction coefficient E	1	1.49	11.10	11.09	0.13	0.73
蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数 V-V rolling friction coefficient F	1	14.08	991.70	991.65	11.77	<0.01**
蚯蚓粪-不锈钢碰撞恢复系数 V-S collided restitution coefficient G	1	4.54	103.00	103.01	1.22	0.30
蚯蚓粪-不锈钢静摩擦系数 V-S static friction coefficient H	1	0.45	1.00	1.03	0.01	0.92
蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数 V-S rolling friction coefficient J	1	9.07	411.20	411.23	4.88	<0.05*
JKR 表面能 JKR surface energy K	1	43.91	9 640.00	9 640.00	114.44	<0.00**
弯曲 Bend	1		605.40	605.35	7.19	0.03
误差 Error	9		758.10	84.24		
合计 Sum	20		12 928.40			

由于筛选试验取值范围较大, 为了进一步快速缩小试验蚯蚓粪的参数至小范围值, 用于析因试验标定, 将蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数, 蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数和 JKR 表面能 3 个显著参数进行最陡爬坡试验^[27], 其余影响效果不显著的参数采用均值, 从 PB 方差分析结果看出, 3 个显著性因素均呈现正向效应, 因素值正向增加会导致试验结果正向增加, 因此以 3 因素均已最低值为

起点进行爬坡, 同时通过实际试验选取含水率最低 25%、含水率最高 65%的蚯蚓粪堆积角试验结果进行极端值验证对比。结果如表 5, 从中可以看出, 仿真结果与试验结果中偏差最小的均为组 2; 因此, 选择组 2 前后的参数范围作为蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数, 蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数, JKR 表面能作为小范围值进行下一步的析因试验。

表 5 最陡爬坡试验结果

Table 5 Results of steep climbing test

组别 Groups	蚯蚓粪-蚯蚓粪 滚动摩擦系数 V-V rolling friction coefficient	蚯蚓粪-不锈钢 滚动摩擦系数 V-S rolling friction coefficient	JKR 表面能 JKR surface energy/(J·m ⁻²)	仿真结果 Simulation result/(°)	25%含水率蚯蚓粪堆积角 Pile angle of 25% moisture vermicompost		65%含水率蚯蚓粪堆积角 Pile angle of 65% moisture vermicompost	
					试验值 Test value/(°)	偏差 Error/%	试验值 Test value/(°)	偏差 Error/%
					1	0.05	0.05	0.05
2	0.15	0.13	0.20	30.94	26		19	
3	0.25	0.21	0.35	76.62	22.97	70	38.03	50
4	0.35	0.29	0.50	84.75		73		55
5	0.45	0.35	0.65	87.41		74		56

针对缩小的范围值, 利用析因试验, 选取蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数为 0.05~0.25, 蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数为 0.05~0.21, JKR 表面能 0.05~0.35 J/m² 进行析因试验, 通过堆积角析因试验建立三者与堆积角的关系模型, 去除模型里面的不显著项, 得到调整模型, 析因试验结果如表 6。

表 6 析因试验结果

Table 6 Results of factorial experiments

序号 No.	蚯蚓粪-蚯蚓粪 滚动摩擦系数 V-V rolling friction coefficient <i>F</i>	蚯蚓粪-不锈钢 滚动摩擦系数 V-S rolling friction coefficient <i>J</i>	JKR 表面能 Johnson Kendall Roberts surface energy <i>K</i> /(J·m ⁻²)	堆积角 Pile angle <i>P</i> /(°)
1	1	0	1 (0.35)	82.55
2	0 (0.15)	1	1	73.61
3	0	1	-1	27.01
4	-1 (0.05)	-1	0 (0.2)	20.16
5	-1	1 (0.21)	0	28.15
6	1 (0.25)	-1	0	50.57
7	-1	0	-1 (0.05)	18.24
8	0	-1 (0.05)	1	70.59
9	-1	0	1	26.96
10	0	0 (0.13)	-1	34.31
11	0	-1	-1	25.7
12	0	0	0	30.11
13	1	1	0	54.41

有建立的析因响应面模型为

$$P=36.9+53F-306J-169K+1322J^2+474K^2+659FK \quad (4)$$

$$(R^2=0.9685)$$

模型的决定系数 R^2 较高, 说明了试验得到的模型拟合效果较好, 可以通过堆积角结果, 反推导试验蚯蚓粪物料的滚动摩擦系数、蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数和 JKR 表面能, 进一步推导出不同含水率下蚯蚓粪的运动摩擦参数。为了验证模型的有效性, 通过不同含水率蚯蚓粪的实际试验与仿真结果验证, 结果如表 7 和图 2, 5 组重复试验结果的误差均小于 5%, 表明模型拟合效果较好。

表 7 模型验证与摩擦参数结果

Table 7 Validation result and friction parameters of vermicompost

组别 Group	含水率 Moisture/%	堆积角试验值 Pile angle experimental value/(°)	堆积角仿真值 Pile angle simulation value/(°)	误差 Error/%	蚯蚓粪-蚯蚓粪 滚动摩擦系数 V-V rolling friction coefficient	蚯蚓粪-不锈钢 滚动摩擦系数 V-S rolling friction coefficient	JKR 表面能 JKR surface energy/ (J·m ⁻²)
A1	25.52±3.06	22.670	22.681	0.048	0.134	0.116	0.179
A2	33.12±3.00	26.670	26.691	0.078	0.125	0.120	0.226
A3	41.51±2.12	28.600	28.752	0.528	0.115	0.105	0.234
A4	50.22±3.01	33.150	33.216	0.198	0.114	0.105	0.277
A5	65.68±3.05	38.030	39.054	2.622	0.110	0.102	0.345

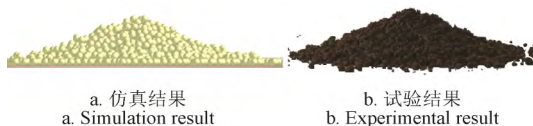


图 2 试验与仿真结果验证

Fig.2 Verification of experiments and simulations

2.2 不同含水率下蚯蚓粪直剪试验

通过直剪试验得到的蚯蚓粪的 $\sigma-\tau$ 的关系如图 3 所示, 在 50~200 kPa 的压力下发生剪切破坏, 试验结果拟合直线 R^2 均在 0.93 以上, 呈较好的线性关系。从应力变化图可以看出, 蚯蚓粪内聚力随着含水率的升高逐渐增大, 内摩擦角随着含水率的增加而减小。可以得到计算

出堆积状态下 A1~A5 组不同含水率下蚯蚓粪内摩擦角分别为 45.81°、40.51°、38.99°、34.43°、26.10°。此外，通过侧压力系数可以得到蚯蚓粪的平均泊松比为 0.22、0.25、0.27、0.30、0.35。

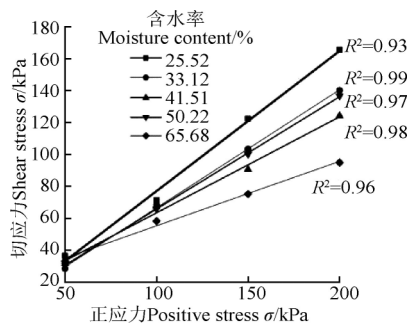


图 3 不同含水率蚯蚓粪的正应力-切应力关系

Fig.3 Relationship between normal stress and shear stress of vermicompost under different moistures

2.3 不同含水率下蚯蚓粪流动性分析

蚯蚓粪的流动方式主要以颗粒滚动运动为主，物料运动过程中显著受到滚动摩擦系数，表面黏附性的影响，按含湿散体物料水分张力与毛细管黏附理论^[28]，颗粒表面凹凸不平，部分颗粒的表面孔隙会形成“水膜”，导致物料表面固-固界面接触面减少，导致固-固接触界面和固-液界面混合存在，表面趋于光滑，滚动摩擦系数略微下降，但与此同时水膜增加导致物料表面张力增加，黏附性能提高，又表现出表面能的提高，物料运动过程中会发生团聚现象。蚯蚓粪的流动性参数变化上，随着蚯蚓粪含水率的增加，蚯蚓粪-蚯蚓粪的滚动摩擦系数由 0.135 下降至 0.110，蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数由 0.116 下降至 0.102，两者呈现小幅度下降，内摩擦角由 45.81° 降至 26.10°（图 4）；此外，蚯蚓粪的含水率的升高使得堆积角增加超过 15°，JKR 表面能由 0.179 J/m² 增加至 0.345 J/m²，增幅显著，导致试验中蚯蚓粪堆积角增大。蚯蚓粪 JKR 表面能影响堆积角极其显著，表明了蚯蚓粪表面黏附性能改变是影响蚯蚓粪流动性的关键。

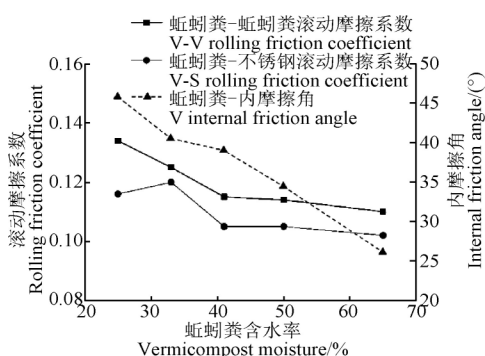


图 4 不同含水率蚯蚓粪流动参数变化

Fig.4 Changes of vermicompost fluidity parameters under different moisture contents

流动属性对蚯蚓粪的收集、分离、运输和加工等机械化作业极为关键，含水率升高，蚯蚓粪之间、蚯蚓粪与不锈钢滚动摩擦系数降低，表面黏附性变强，导致物料在滚动时发生阻力改变明显，物料流动性改变。实际

生产中改变含水率能够显著改变蚯蚓粪的流动性能，含水率低于 50%之前，随着含水率增加，物料滚动摩擦系数减小，内摩擦角减小，更易发生翻滚运动，流动性较好；但含水率超过 50%之后由于表面能增高，内聚力增大，蚯蚓粪物料之间易发生物料黏结团聚，一定程度上又会阻碍蚯蚓粪的翻滚运动。

3 结论与讨论

通过堆积角真实与虚拟试验结合的方法，量化不同含水率蚯蚓粪颗粒流动性的参数指标并进行分析，结果表明：1）显著影响蚯蚓粪颗粒堆积角的因素为蚯蚓粪-蚯蚓粪滚动摩擦系数，蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数，JKR 表面能（Johnson Kendall Roberts surface energy）；2）随着蚯蚓粪含水率由 25%升至 65%，蚯蚓粪-蚯蚓粪的滚动摩擦系数由 0.135 下降至 0.110，蚯蚓粪-不锈钢滚动摩擦系数由 0.116 下降至 0.102，内摩擦角由 45.81°降至 26.10°，而 JKR 表面能由 0.179 增加至 0.345 J/m²；3）蚯蚓粪含水率增加，导致堆积角增加，蚯蚓粪流动性变差的核心原因是水分增加导致蚯蚓粪颗粒的表面能增大，颗粒的黏聚程度增加，改变含水率能够明显改善蚯蚓粪颗粒的流动性。

实际生产中为了满足蚯蚓粪的应用需求，高含水率蚯蚓粪黏附性过高，可以通过手段控制蚯蚓粪含水率在 40%~50%之间，一定程度上少量提高含水率，有助于蚯蚓粪滚动性能的提升，但由于蚯蚓粪含水率的改变对于蚯蚓粪保水保肥，养分等性能的改变是否有影响，将是未来进一步需要探究的方向。

[参 考 文 献]

- [1] Blouin M, Hodson M E, Delgado E A, et al. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(2): 161–181.
- [2] Bertrand M, Barot S, Blouin M, et al. Earthworm services for cropping systems: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35: 553–567.
- [3] Lim S L, Lee L H, Wu T Y, et al. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 111: 262–278.
- [4] 赵海涛, 狄霖, 刘平, 等. 蚯蚓生物床工程处理对牛粪性质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 255–259. Zhao Haitao, Di Lin, Liu Ping, et al. Effect of earthworm bio-bed treatment on properties of cow manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 255–259. (in Chinese with English abstract)
- [5] Edwards C A, Arancon N Q, Sherman R. Vermicultural Technology[M]. London: New York: CRC Press, 2011.
- [6] 李晓明, 杨晓红, 何新权, 等. 以蚯蚓为链条的低碳循环农业[J]. 陕西农业科学, 2010(6): 95–97. Li Xiaoming, Yang Xiaohong, He Xinquan, et al. Low carbon recycling agriculture by the bridge of earthworm[J].

- Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2010(6): 95-97. (in Chinese with English abstract)
- [7] 宋艳晶, 刘艳琴, 韩立军, 等. 蚯蚓粪对家禽粪便中主要产臭气微生物的影响[J]. 家畜生态学报, 2008(3): 86-89. Song Yanjing, Liu Yanqin, Han Lijun, et al. Selection of enzymolysis technologic parameter in defatted fly maggot[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2008(3): 86-89. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孙永明. 规模化蚯蚓反应器系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006. Sun Yongming. Vermicomposting Engineering System for Organic Waste Conversation in Large Scale[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李云格. 蚯蚓粪除臭作用及在肉鸡养殖中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. Li Yunge. Deodorization of Wormcast and its Use in Bolier Breeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [10] 许永利, 张俊英, 李富平. 蚯蚓粪的综合利用研究现状[J]. 安徽农业科学, 2007(23): 7179-7180. Xu Yongli, Zhang Junying, Li Fuping. Research situation of comprehensive utilization of earthworm feces[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2007(23): 7179-7180. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孙振钧, 孙永明. 蚯蚓反应器与废弃物肥料化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [12] 杨龙元, 袁巧霞, 刘志刚, 等. 牛粪好氧和蚯蚓堆肥腐熟料成型基质块制备及育苗试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 226-233. Yang Longyuan, Yuan Qiaoxia, Liu Zhigang, et al. Experiment on seedling of compressed substrates with cow dung aerobic composting and earthworm cow dung composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 226-233. (in Chinese with English abstract)
- [13] 林嘉聪, 刘志刚, 袁巧霞, 等. 蚯蚓分离方法与设备的研究现状[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(2): 103-109. Lin Jiacong, Liu Zhigang, Yuan Qiaoxia, et al. Research progress on earthworm separating methods and devices[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(2): 103-109. (in Chinese with English abstract)
- [14] 林嘉聪, 刘志刚, 邢行, 等. 不同光照条件下蚯蚓避光性运动与蚓粪机械分离参数量化分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 235-241. Lin Jiacong, Liu Zhigang, Xing Hang, et al. Earthworm photophobic movement under different light conditions and quantitative analysis of mechanical separating vermicompost parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(2): 235-241. (in Chinese with English abstract)
- [15] 谢洪勇, 刘志军. 粉体力学与工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [16] 王国强, 郝万军, 王继军. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [17] 龚明. 材料物料特性参数标定[R]. 北京: EDEM 用户大会报告, 2013.
- [18] 韩燕龙, 贾国富, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(37): 174501-1-7. Han Yanlong, Jia Guofu, Tang Yurong, et al. Discrete element simulation of mechanical properties of wet granular pile[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(37): 174501-1-7 (in Chinese with English abstract)
- [19] 石林榕, 赵武云, 孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 181-187. Shi Linrong, Zhao Wuyun, Sun Wei. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 181-187. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 with English abstract)
- [21] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98. Wu Tao, Huang Weifeng, Chen Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42. Wang Yunxia, Liang Zhijie, Zhang Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [24] Johnson K L, Kendall K, Robert A D. Surface energy and contact of elastic solids[J]. Proceedings of The Royal Society A, 1971, 324: 301-313.
- [25] 黄松元. 散体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [26] Thomas Roessler, André Katterfeld. Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using up scaled particles[J]. Power Technology, 2018, 330: 58-66.
- [27] 任露泉. 试验设计与优化[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [28] 任露泉. 土壤黏附力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

Flow properties of vermicompost particle with different moisture contents

Lin Jiacong^{1,2}, Luo Shuai^{1,2}, Yuan Qiaoxia^{1,2*}, Cao Hongliang¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The earthworm processing of waste is recognized as a very sustainable approach for management of organic wastes. The vermicompost resulted from this procession has been proved to be practical and useful in farming, substrate nursery, gas absorbent etc. However, this technology has been widely adopted to treat different organic waste material. Most of scientific investigation in vermicompost concentrates on its nutrient characteristics and microorganism rather than physical properties. The flow ability is key factor for the mechanized operation of vermicomposting. The basic parameters like rolling friction coefficient and surface energy are needed for the equipment design, material calculation, and vermicompost product manufacture. The moisture content of vermicompost can reach 40%-50% under natural condition, even with high moisture content, the vermicompost can still keep the granular condition. Flow parameters, such as friction coefficient, cannot simply test though the normal physical method. In order to provide the quantized flow parameters of vermicompost for mechanization, in this study, vermicompost transformed from pure cow dung by the worm procession was used. The experiments were undertaken in condition of different moisture contents, changing from 25%-65%. The friction coefficient and surface energy were investigated by the method of pile angle simulation and calibration using discrete element method (DEM). First, Plackett-Burman (PB) design was conducted to select the impacted physical frictional parameter factors that have significant influence on pile angle. Then, the steep climbing test was conducted to shorten the parameter ranges from the maximum range of PB design. According to the result of steep climbing test, the response surface methodology (RSM) was carried out to build the model which can reflect the relationship between pile angle and friction coefficients. Besides, for explaining the flow ability of vermicompost in further, the direct shearing test was applied to calculate the internal frictional angle of vermicompost with different moisture contents. The results of experiment indicated that three key factors vermicompost-vermicompost rolling friction coefficient, vermicompost-steel rolling friction coefficient and Johnson Kendall Roberts surface bonding energy (JKR surface energy), significantly affected the pile angle ($P < 0.05$). With the rising of moisture content from 25% to 65%, the vermicompost-vermicompost rolling friction coefficient dropped from 0.135 to 0.110, the vermicompost-steel rolling friction coefficient dropped from 0.116 to 0.102. From the result, the surface energy was the most impact factor in three factors, which changed from 0.179 to 0.345 J/m². The few rise of moisture content can improve the flow ability of vermicompost significantly under low moisture content condition. When the moisture content was over 50%, the surface energy and the cohesion force were increased, which would restrict the flow movement of vermicompost to some extent. The study is expected to provide numerical parameter reference for the practical application and development of mechanization.

Keywords: manures; moisture; vermicompost; friction coefficient; flow ability; bonding properties; discrete element method (DEM)