

基于颗粒缩放理论的沙棘茶毫 离散元参数标定

王清泽, 杨梅, 向金田, 张强林, 张文洁, 李旭杰, 胡靖明

(甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:为解决沙棘叶茶茶毫离散元仿真中缺乏准确接触参数的问题,利用物理和仿真休止角堆积试验标定茶毫接触参数;将茶毫颗粒简化为软质球形颗粒,通过量纲分析和颗粒缩放理论将茶毫空气动力学当量粒径从231.37 μm 放大至1.8 mm。利用EDEM软件,选定“Hertz - Mindlin with JKR”接触模型,以休止角为响应值,通过Plackett-Burman试验筛选出对休止角影响最显著的3个参数:茶毫-茶毫恢复系数、茶毫-茶毫滚动摩擦系数、茶毫-不锈钢滚动摩擦系数;利用最陡爬坡试验,确定各参数最佳取值范围;根据Box-Behnken试验建立并优化3个显著性参数与休止角的二阶回归方程,对回归方程进行寻优求解。得到3个显著性参数的最优组合:茶毫-茶毫恢复系数为0.159,茶毫-茶毫滚动摩擦系数为0.290,茶毫-不锈钢滚动摩擦系数为0.239。通过对比休止角仿真试验值与物理试验值,二者相对误差为1.97%,表明仿真试验预测效果良好。

关键词:沙棘;茶毫粉尘;颗粒缩放理论;离散元;参数标定

中图分类号:S793.6;S24;TS272 **文献标志码:**A

Discrete element parameters calibration of *Hippophae rhamnoides* based on particle scaling theory

WANG Qingze, YANG Mei, XIANG Jintian, ZHANG Qianglin, ZHANG Wenjie, LI Xvjie, HU Jingming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To address the lack of accurate contact parameters in the discrete element simulation of sea buckthorn leaf tea hair, a physical and simulation resting angle heap experiment was conducted to calibrate the contact parameters of tea hair. The tea hair particles were simplified as soft spherical particles. By dimensional analysis and particle scaling theory, the aerodynamic equivalent diameter of tea hair was enlarged from 231.37 μm to 1.8 mm. The EDEM software was used with the “Hertz-Mindlin with JKR” contact model. The repose angle was chosen as the response variable, and a Plackett-Burman experiment was performed to select the three most significant parameters affecting the resting angle: the tea hair-tea hair restitution coefficient, the tea hair-tea hair rolling friction coefficient, and the tea hair-stainless steel rolling friction coefficient. The optimal parameter ranges were determined using a steepest ascent test. Based on Box-Behnken experimental design, a second-order regression equation was established and optimized for the three significant parameters and repose angle. The three significant parameters for the optimal combination were as follow: tea hair-tea hair restitution coefficient was 0.159, tea hair-tea hair rolling friction coefficient was 0.290, and tea hair-stainless steel rolling friction coefficient was 0.239. A comparative analysis between the simulated repose angle values and the real values from physical experiments yielded a relative error was 1.97%, indicating good predictive performance in simulation experiments.

Keywords: *Hippophae rhamnoides*; tea dust; particle scaling theory; DEM; parameter calibration

收稿日期:2023-08-12

修回日期:2023-11-03

基金项目:国家自然科学基金(52065006);甘肃省科技计划资助项目(22YF7NA114)

作者简介:王清泽(1998-),男,山西大同人,硕士研究生,研究方向为特色林果加工设备。E-mail: 1456623292@qq.com

通信作者:胡靖明(1975-),男,甘肃成县人,副教授,主要从事旱区农业工程技术与装备和特色林果加工设备研究。E-mail: hujm@gsau.

edu.cn

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)是胡颓子科沙棘属植物,别名醋柳、酸刺等^[1]。研究表明,沙棘叶中黄酮类、多酚等活性成分高于沙棘果,具有降脂、降糖、抗氧化等作用^[2-3]。沙棘叶可以治疗风湿关节炎、胃肠道类疾病;也可以用作饲料,使动物体重增加,皮毛发亮^[4-6]。此外,沙棘叶生物蕴藏量大、采收期长,其开发潜力和经济价值都值得深入研究^[7]。

常见的沙棘叶茶类型有红茶、绿茶、复合茶等^[8]。在加工过程中,受机械、物理等作用的影响,沙棘叶表皮茸毛会脱落形成茶毫^[9]。茶毫会造成操作人员哮喘、尘肺;茶毫含量过多会导致袋泡茶封装效果不达标甚至无法封装,严重降低沙棘叶茶的口感;生产环境中茶毫粉尘浓度过高,容易引发粉尘爆炸等危险^[10]。茶毫各项物理参数可以为茶毫离散元仿真和除毫装置的设计研究提供数据支撑。目前,关于散体物料仿真参数标定已有大量研究,田剑锋等^[11]通过仿真试验逼近物理试验的方法对党参种子的种间-材料滚动摩擦系数和种间滚动摩擦系数进行了标定;李永祥等^[12]利用颗粒缩放理论将小麦粉粒径放大约6倍,通过休止角仿真试验和响应面优化试验对小麦粉接触参数进行了标定;罗帅等^[13]基于黏结模型,提出一种通过测定蚯蚓粪含水率预测休止角的方法,进一步推测出其他参数值的参数标定方法;Sakai等^[14]提出一种大规模DEM模拟的粗颗粒模型,并在流化床中通过数值模拟,证明该模型能精确模拟原颗粒物理特性。利用离散元法(DEM, discrete element method)对沙棘茶毫物理特性标定的研究尚未见报道。

本研究利用相似理论和量纲分析将茶毫颗粒放大,通过离散元仿真软件 EDEM 进行休止角仿真,应用 Design expert 软件设计 Plackett-Burman、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验对放大后颗粒进行离散元仿真实接触参数标定,得到最优接触参数组合,旨在为茶毫粉尘等相关离散元模拟研究提供参考。

1 材料与物性参数

1.1 试验材料

参试材料为中国沙棘叶茶茶毫,采集于甘肃省张掖市民乐县甘农生物科技有限公司沙棘叶茶加工生产线,原材料经过40目标准筛分离得试验所用茶毫,其平均粒径为420 μm。

1.2 沙棘茶毫的物性参数测量

参照 GB/T 16913-2008^[15]中关于粉尘堆积密度的测定方法,取量程为50 mL的量筒,置于分析天平上校准,用药匙将沙棘茶毫加入量筒,每添加10 mL茶毫测算一次堆积密度,测量4次,最后得到茶毫的平均堆积密度为265.07 kg·m⁻³。

因茶毫颗粒为不规则形状^[16],其直径采用斯托克斯径(d_{st})表示,此方法是将不规则粒子等效为具有相同沉降速度的球状粒子^[17]。斯托克斯径的计算公式为:

$$d_{st} = \sqrt{\frac{18v_p\lambda}{(\rho_D - \rho_A)g}} \quad (1)$$

式中, d_{st} 为斯托克斯径(m); λ 为空气动力黏度(Pa·s); v_p 为粒子沉降速度(m·s⁻¹); ρ_D 为粒子密度(kg·m⁻³); ρ_A 为空气密度(kg·m⁻³); g 为重力加速度(m·s⁻²)。

粒子沉降速度与其悬浮速度大小相等、方向相反^[12,17-18],采用自制物料悬浮速度测定装置测定茶毫悬浮速度,将物料称重后放入盛料网,通过调节变频器改变风机转速,使物料悬浮于锥形观察管的3个不同阶段,读取风速仪的测量值和悬浮高度,通过公式(2)计算出悬浮速度。

$$v_p = \bar{v} \left(\frac{R}{R + S \tan \alpha} \right)^2 \quad (2)$$

式中, \bar{v} 为流速平均值(m·s⁻¹); R 为锥形观察管入口端内径(mm); S 为悬浮高度(mm); α 为锥形观察管倾角(°)。

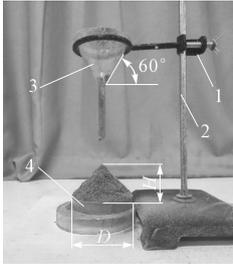
结合试验结果和公式(1)、(2)可得出茶毫悬浮速度为0.32~0.55 m·s⁻¹,茶毫粒径范围为200.236~262.512 μm,取其平均值231.374 μm。

依据国家标准 GB/T 11986—89^[19]、GB/T 16913.5—1997^[20],参考粉体物料休止角测定相关研究^[21-24],采用漏斗法测定茶毫休止角,试验装置如图1所示。该装置由铁架台、玻璃漏斗和底盘组成,底盘直径为80 mm,漏斗出口内径为10 mm,漏斗出口距底盘75 mm。试验时用药匙将茶毫缓慢加入漏斗中,粉末沿漏斗落入底盘形成堆积状态,当少量茶毫溢出底盘时停止添加,待堆积稳定后记录堆积高度。休止角计算公式为:

$$\theta = \arctan \frac{2H}{D} \quad (3)$$

式中, θ 为休止角(°); H 为堆积高度(mm); D 为底盘直径(mm)。

根据公式(3)计算出休止角,试验重复5次,求得茶毫的休止角平均值为47.71°。



注: H 为茶毫堆积高度 (mm); D 为底盘直径 (mm)。
1. 铁圈; 2. 铁架台; 3. 漏斗; 4. 底盘。
Note: H is the height of the tea hair stack (mm); D is the chassis diameter (mm). 1. Hoops; 2. Iron support; 3. Funnel; 4. Chassis.

图 1 休止角测定装置

Fig.1 Repose angle measuring device

2 颗粒缩放理论

2.1 量纲分析

为使缩放后粒子模型与原物理模型物性尽可能保持一致,对粒子进行简化和缩放处理,同时调整粒子仿真参数,以保证试验的正确性。通过引入尺度因子,建立缩放模型和物理模型单个物理量的比例关系^[25]。

$$\bar{q} = \lambda_q \cdot q \quad (4)$$

式中, \bar{q} 为缩放模型任一参数; q 为物理模型任一参数; λ_q 为尺度因子。

一般物理系统中各物理量之间相互联系,通过几个独立物理量可以推导出其他物理量,进一步建立起缩放模型。选择长度 (L)、密度 (ρ)、时间 (T) 作为基本物理量,则基本物理量比例因子可表示为: $\lambda_L = h$; $\lambda_\rho = 1$; $\lambda_T = h$ ^[26]。其他参数模型可表示为:

$$\lambda_q = \lambda_L^a \lambda_T^b \lambda_\rho^c = h^i \quad (5)$$

式中, h 为比例因子; a, b, c 为常数; i 为 $0, 1, 2, \dots, n$ 任意数。

对于质量 $M = \rho V$ 有:

$$M = \rho L^3 \Rightarrow \lambda_M = \lambda_\rho \lambda_L^3 = h^3 \quad (6)$$

根据牛顿第二定律 $F = Ma$ 有:

$$F = MLT^{-2} \Rightarrow \lambda_F = \lambda_\rho \lambda_L^4 \lambda_T^{-2} = h^2 \quad (7)$$

物料颗粒的杨氏模量 E 、应力 σ 、应变 ε 可以表示为:

$$\begin{cases} E = \frac{FL}{Au} \\ \sigma = \frac{F}{A} \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \end{cases} \quad (8)$$

式中, u 为颗粒的轴向位移, $\lambda_u = 1$; A 为颗粒面积。

将式(6)、(7)代入式(8),可得:

$$\begin{cases} \lambda_E = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_T^{-2} = 1 \\ \lambda_\sigma = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_T^{-2} = 1 \\ \lambda_\varepsilon = \lambda_\sigma / \lambda_E = 1 \end{cases} \quad (9)$$

通过量纲分析可得,对于颗粒材料,其杨氏模量 E 、应力 σ 和应变 ε 只与材料密度有关,与缩放因数 h 无关。

对于 JKR (Johnson Kendall Roberts) 黏结颗粒模型,相邻粒子间法向接触力为:

$$F_n = \frac{4E^* a^3}{3R^*} - \sqrt{8\pi\Delta\gamma E^* a^3} \quad (10)$$

式中, F_n 为法向接触力 (N); E^* 为颗粒有效杨氏模量 (Pa); R^* 为颗粒有效半径 (m); a 为接触半径 (m); $\Delta\gamma$ 为颗粒表面自由能 ($J \cdot m^{-2}$)。

颗粒有效杨氏模量 E^* 和颗粒有效半径 R^* 为:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \mu_j^2}{E_j} \quad (11)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (12)$$

式中, E_i, E_j 为两颗粒各自杨氏模量 (Pa); μ_i, μ_j 为两颗粒各自泊松比; R_i, R_j 为两颗粒各自半径 (m)。

将式(10)转换为应力-应变形式为:

$$\sigma(\varepsilon, R^*) = \frac{F_n}{A} = \frac{4E^*}{3} \varepsilon^{\frac{3}{2}} - \sqrt{\frac{8\pi\Delta\gamma E^*}{R^*}} \varepsilon^{\frac{3}{4}} \quad (13)$$

从式中可以看出,等式右边第一项具有尺度不变性。若 $\Delta\gamma/R^*$ 为常数,即颗粒表面自由能随着颗粒缩放而变化,若第二项满足 Hertz 接触理论,则 JKR 黏结颗粒接触模型的尺度是不变的。

由量纲分析可知,缩放模型密度、杨氏模量、应力和应变都保持不变,表明仿真试验时物料本征参数保持一致。

2.2 相似理论

Feng 等^[26] 参考传统流体力学中相似原理,创建了离散元仿真建模的相似理论,即物料颗粒缩放前后须符合几何相似原则、力学相似原则和动态相似原则,此理论对球形颗粒和其他形状颗粒同样适用。为简化分析,将不规则形状的沙棘茶毫颗粒看作软质球形颗粒,相邻颗粒接触模型如图 2 所示。

两颗粒接触时法向力 F_n 为:

$$F_n = F(R, \delta_n) \quad (14)$$

引入颗粒特征长度 L 、面积 A 和体积 V ,则对于半径为 R 的球体:

$$L = 2R \quad (15)$$

$$A = L^2 \quad (16)$$

$$V = AL^2 = L^3 \quad (17)$$

对于单个颗粒接触时的应力、应变公式为:

$$\sigma(R, \delta_n) = F(R, \delta_n) / A \quad (18)$$

$$\varepsilon = \delta_n / L \quad (19)$$

两接触颗粒相互作用的应力-应变形式为:

$$\sigma = \sigma(R, \varepsilon) \quad (20)$$

则粒子应变能 E 与 F 相互作用关系为:

$$E(\delta, R) = \int_0^\delta F(\delta, R) d\delta \quad (21)$$

粒子缩放前后的几何相似性必须满足以下函数关系,且缩放前后模型的堆积构型应保持相同:

$$\frac{R_b}{R_d} = \frac{L_b}{L_d} = h \quad (22)$$

式中, R 为茶毫粒子的半径 (mm); L 为茶毫粒子特征长度; h 为比例因子; 下标 b 指缩放后粒子; 下标 d 指缩放前粒子。

根据力学相似性原则,缩放后粒子函数关系如式 (23)、(24) 所示。

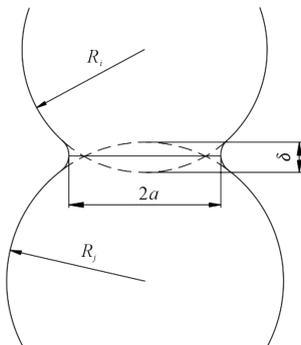
$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_d} = \frac{L_b}{L_d} = \frac{R_b}{R_d} = h \quad (23)$$

$$\frac{F_b(\varepsilon_b, R_b)}{F_d(\varepsilon_d, R_d)} = \frac{Q_b}{Q_d} = \frac{A_b}{A_d} = h^2 \quad (24)$$

式中, $F(\varepsilon, R)$ 为粒子相互作用力; Q 为粒子所受合力。

根据动态相似原则,缩放前后粒子的函数关系为:

$$\frac{\rho_b}{\rho_d} = h^{-2} \quad (25)$$



注: R_i, R_j 为颗粒半径; δ 为两颗粒的法向重叠量; a 为接触半径。

Note: R_i, R_j is the particle radius; δ is the amount of normal overlap of 2 particles; a is the contact radius.

图 2 软质球形颗粒接触模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of contact model of soft spherical particles

3 参数标定

3.1 仿真参数

参考国内外文献对散体物料与不锈钢接触参数离散元仿真中的设置^[25-27],结合缩放理论规则和粉体相关研究,本研究将茶毫物性参数设为:密度 $265.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、泊松比 0.25、剪切模量 $6 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。材料接触参数受温度、环境等多种因素影响,无法通过物性试验或查阅参考文献获取,因此通过虚拟试验进行标定。

3.2 仿真模型建立

茶毫仿真试验中的参数类型包括物性参数、接触参数和接触模型参数^[26]。因茶毫粒径较小且与粉尘相似,其接触参数和部分物性参数难以直接测量。本研究参考其他相似粉体物料的离散元仿真研究^[27-28],并通过 EDEM 自带的 GEMM 数据库,得到模型仿真参数的取值范围如表 1 所示。

接触模型对整个仿真试验的准确性有着重要影响,因茶毫具有一定的吸附性,本研究选择“Hertz-Mindlin with JKR”模型。参考图 1 所示装置,在三维建模软件 Solidworks 中进行试验装置建模,因为物料休止角与底盘直径大小无关,为了缩短仿真计算时间,将底盘直径设为 50 mm,漏斗底部出口内径为 10 mm,且距离底盘 75 mm。将三维模型导入 EDEM

表 1 离散元仿真参数表

Table 1 Parameters required in DEM simulation

仿真参数 Simulation parameter	数值 Value
茶毫密度 Tea hair density	$265.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
茶毫泊松比 Tea hair Poisson's ratio	0.2~0.4
茶毫剪切模量 Tea hair shear modulus	$1.1 \times 10^7 \sim 6.0 \times 10^7 \text{ Pa}$
不锈钢密度 Stainless steel density	$7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
不锈钢泊松比 Stainless steel Poisson's ratio	0.3
不锈钢剪切模量 Stainless steel shear modulus	$7 \times 10^{10} \text{ Pa}$
茶毫-茶毫恢复系数 Tea hair-tea hair restitution coefficient	0.1~0.5
茶毫-茶毫静摩擦系数 Tea hair-tea hair static friction coefficient	0.2~1.0
茶毫-茶毫滚动摩擦系数 Tea hair-tea hair rolling friction coefficient	0.05~0.30
茶毫-不锈钢恢复系数 Tea hair-stainless steel restitution coefficient	0.10~0.45
茶毫-不锈钢静摩擦系数 Tea hair-stainless steel static friction coefficient	0.2~0.6
茶毫-不锈钢滚动摩擦系数 Tea hair-stainless steel rolling friction coefficient	0.1~0.5
JKR 自由能 Johnson Kendall Roberts	$0.01 \sim 0.50 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$

软件中,设置沙棘茶毫颗粒为单球型。参考离散元模拟中有关颗粒缩放的相关文献^[12,26],将颗粒粒径放大 8 倍至 1.8 mm。设置颗粒生成方式为 Dynamic,生成数量为 60 000 颗,生成速率为 1 200 颗·s⁻¹,仿真时间为 8 s,时间步长为 30%,待物料少量溢出后,停止颗粒生成继续完成仿真,待堆积高度不变后,结束仿真。

3.3 休止角测定

为降低休止角的测量误差,仿真试验完成后截图保存,利用 MATLAB 软件,对图片进行二值化处理,通过 Sobel 算子对二值化处理后的图片进行边界提取和曲线拟合,获得茶毫仿真休止角,仿真试验结果的处理如图 3 所示。

3.4 仿真试验设计

3.4.1 Plackett-Burman 试验 Plackett-Burman 试验(简称 PB 试验)属于显著因子筛选试验,其原理是通过各因子二水平交互对休止角的影响进行分析,来确定影响因子的显著性^[29]。本研究试验因素及取值范围如表 2 所示。各因素的低水平为取值范围最小值,高水平设为低水平的 2 倍,中心点数设为 1,试验方案及结果如表 3 所示。

对试验结果进行方差分析如表 4 所示。由表 4 可得,茶毫-茶毫滚动摩擦系数(*C*)的 $P < 0.01$,对休止角仿真试验结果影响极其显著;茶毫-茶毫恢复系数(*A*)、茶毫-不锈钢滚动摩擦系数(*F*)的 $P < 0.05$,对休止角仿真试验结果影响显著;其余参数 $P > 0.05$,对休止角仿真试验结果影响极小。

3.4.2 最陡爬坡试验 最陡爬坡试验能准确反映试验因素最优取值范围,进一步缩小试验因素的最优响应区间。根据 PB 试验方差分析结果,选取对试验结果影响显著的 3 个因素(*A*、*C*、*F*)进行最陡爬坡试验。爬坡步长根据 PB 试验所得的回归方程系数来确定,*A*、*C*、*F* 分别为 0.05、0.10、0.05,其余参数取中间水平;*B*、*D*、*E*、*G* 分别为 0.30、0.15、0.30、0.015,本爬坡试验设计及结果如表 5 所示。可知随着参数值的增加,仿真试验的休止角也随之增加,相对误差由大到小再到,3 号水平休止角相对误差最小,所以响应面试验选 3 号水平为中心点,2 号水平为低水平,4 号水平为高水平。

3.4.3 Box-Behnken 试验及回归模型 为得到影响显著因素的准确值,采用 Box-Behnken 试验进行响应面回归试验,得到相关参数的数学回归模型。根据爬坡试验结果设置高、中、低 3 个水平,中心点数设为 3。Box-Behnken 试验设计及结果如表 6 所示。

表 2 Plackett-Burman 试验参数列表

Table 2 Plackett-Burman test parameter list

代码 Code	参数 Parameter	水平 Level	
		低 Low (-1)	高 High (1)
<i>A</i>	茶毫-茶毫恢复系数 Tea hair-tea hair restitution coefficient	0.10	0.20
<i>B</i>	茶毫-茶毫静摩擦系数 Tea hair-tea hair static friction coefficient	0.20	0.40
<i>C</i>	茶毫-茶毫滚动摩擦系数 Tea hair-tea hair rolling friction coefficient	0.05	0.10
<i>D</i>	茶毫-不锈钢恢复系数 Tea hair-stainless steel restitution coefficient	0.10	0.20
<i>E</i>	茶毫-不锈钢静摩擦系数 Tea hair-stainless steel static friction coefficient	0.20	0.40
<i>F</i>	茶毫-不锈钢滚动摩擦系数 Tea hair-stainless steel rolling friction coefficient	0.10	0.20
<i>G</i>	JKR 表面能 Johnson kendall Roberts/(J·m ⁻²)	0.01	0.02
<i>H</i>	虚拟因子 1 Virtual factor 1	-1	1
<i>J</i>	虚拟因子 2 Virtual factor 2	-1	1
<i>K</i>	虚拟因子 3 Virtual factor 3	-1	1
<i>L</i>	虚拟因子 4 Virtual factor 4	-1	1

表 3 Plackett-Burman 试验设计及结果

Table 3 Design and results of Plackett-Burman test

序号 Serial number												休止角 Repose angle $\theta/(\circ)$
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31.63
2	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	37.30
3	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	31.40
4	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	35.42
5	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	28.24
6	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	27.70
7	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	29.19
8	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	33.17
9	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	34.05
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	31.97
11	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	32.51
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	26.23
13	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	31.45

Box-Behnken 试验优化结果的方差分析如表 7 所示,拟合模型 $P < 0.0001$,表明该模型极为显著;茶毫-不锈钢滚动摩擦系数(*F*)的 $P < 0.05$,表明对拟合结果影响显著;茶毫-茶毫恢复系数(*A*)、茶毫-茶毫滚动摩擦系数(*C*)、茶毫间恢复系数-滚动摩擦系数(*A*×*C*)、茶毫间恢复系数-不锈钢滚动摩擦系数(*A*×*F*)、茶毫间恢复系数二次项(*A*²)、茶毫间滚动摩擦系数二次项(*C*²)、茶毫-不锈钢滚动摩擦系数二次项(*F*²)的 $P < 0.01$,对拟合结果影响极显著。失拟项 $P = 0.3746 > 0.05$,表明该仿真模型无失拟现象发生且模型回归方程拟合性程度较高;变异系数 *CV*

$= 1.05\% < 10\%$, 表明该仿真试验可靠性较高; 决定系数 $R^2 = 0.997$, 校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.993$, 预测决定系数 $R_{pre}^2 = 0.975$, 其值均大于 0.9, 表明该模型能反映真实情况。试验精密度 Adeq Precision = 45.081, 表明该模型精度满足要求。

表 4 Plackett-Burman 试验方差分析

Table 4 Variance analysis of Plackett-Burman test

参数 Parameter	效应 Effect	均方和 Sum of squares	影响率 Contribution /%	F 值 F value	P 值 P value	显著性 排序 Significance rank
A	11.867	13.930	2.155	16.330	0.016	3
B	0.094	0.110	-0.162	0.129	0.738	5
C	64.791	76.050	5.035	89.140	0.001	1
D	5.141	6.040	1.418	7.070	0.056	4
E	0.145	0.170	0.238	0.200	0.678	7
F	14.906	17.050	2.415	20.510	0.011	2
G	0.412	0.484	-0.402	0.567	0.493	6

表 5 最陡爬坡试验设计及结果

Table 5 Design and results of steepest climbing test

序号 Serial number	A	C	F	休止角 Repose angle $\theta / (^\circ)$	相对误差 Relative error / %
1	0.10	0.05	0.10	33.49	29.80
2	0.15	0.15	0.15	37.57	21.25
3	0.20	0.25	0.20	47.11	1.26
4	0.25	0.35	0.25	52.94	8.99
5	0.30	0.45	0.30	55.56	16.45

表 6 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 6 Design and results of Box-Behnken test

序号 Serial number	A	C	F	休止角 Repose angle $\theta / (^\circ)$
1	0.20	0.25	0.20	48.20
2	0.20	0.35	0.15	50.01
3	0.20	0.15	0.25	36.55
4	0.25	0.35	0.20	50.15
5	0.15	0.25	0.25	42.85
6	0.25	0.25	0.15	44.33
7	0.20	0.35	0.25	50.47
8	0.25	0.15	0.20	40.28
9	0.20	0.25	0.20	48.48
10	0.15	0.25	0.15	43.92
11	0.25	0.25	0.25	48.34
12	0.15	0.15	0.20	34.43
13	0.20	0.25	0.20	47.74
14	0.20	0.15	0.15	35.94
15	0.15	0.35	0.20	50.35

根据上述分析结果, 除去对仿真结果影响不显著项 ($C \times F$), 优化后回归方程为:

$$\theta = -42.34 + 220.5A + 276.6C + 215.63F - 302.5AC + 508AF - 544A^2 - 297.75C^2 - 768F^2 \quad (26)$$

图 4 为交互项响应图, 由 $A \times C$ 响应面图可得, 茶毫间滚动摩擦系数 (C) 曲线的斜率大于茶毫间恢复系数 (A) 曲线斜率, 表明茶毫间滚动摩擦系数 (C) 对休止角的影响更加显著。由 $A \times F$ 响应面图可得, 茶毫间恢复系数 (A) 曲线的斜率大于茶毫-不锈钢滚动摩擦系数 (F) 曲线的斜率, 表明茶毫间恢复系数 (A) 对休止角影响较为显著。

3.5 最优组合参数的确定与验证

以物理试验中茶毫休止角为求解目标, 为使仿真试验结果尽可能贴合物理试验, 利用 Design Expert 软件对优化后的回归方程寻优求解, 得最优参数组合为: 茶毫-茶毫恢复系数 0.159、茶毫-茶毫滚动摩擦系数 0.290、茶毫-不锈钢滚动摩擦系数 0.239。利用最优参数组合进行休止角仿真试验, 得到仿真休止角 48.65° , 与物理试验休止角值 47.71° 的相对误差仅为 1.97%。图 5 为仿真试验与物理试验对比图, 从图中可看出, 仿真结果与物理试验的堆积形态和休止角都近乎一致, 表明仿真结果能很好地预测物理试验。

表 7 Box-Behnken 试验结果优化仿真分析

Table 7 Optimization simulation analysis of Box-Behnken test results

方差来源 Source of variation	均方 Mean square	自由度 Freedom	平方和 Quadratic sum	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	55.3700	8	442.9900	248.92	<0.0001
A	16.6800	1	16.6800	74.96	0.0001
C	361.5400	1	361.5400	1625.19	<0.0001
F	2.0100	1	2.0100	9.04	0.0238
AC	9.1500	1	9.1500	41.13	0.0007
AF	6.4500	1	6.4500	29.00	0.0017
A^2	6.8300	1	6.8300	30.70	0.0015
C^2	32.7300	1	32.7300	147.15	<0.0001
F^2	13.6100	1	13.6100	61.19	0.0002
残差 Residual	1.3300	6	0.2225		
失拟项 Lack of fit	1.0600	4	0.2639	1.89	0.3746
纯误差 Pure error	0.2792	2	0.1396		
总和 Sum	444.3200	14			



图 3 仿真试验结果处理图

Fig.3 Simulation test result processing diagram

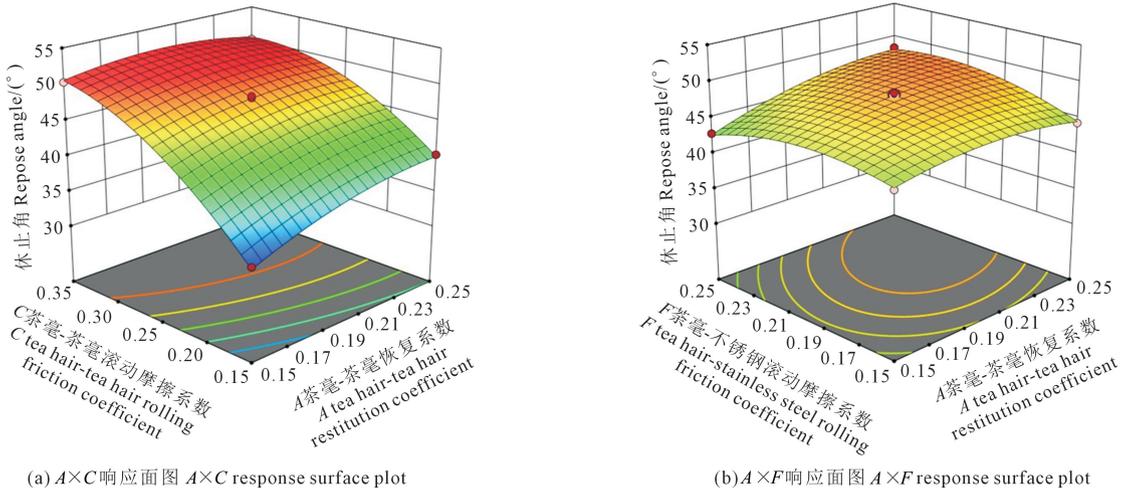
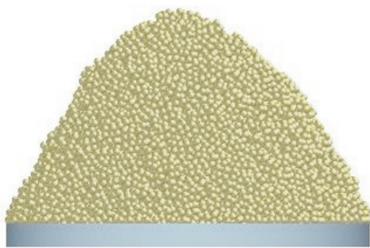


图 4 交互项响应面图

Fig.4 Interaction response surface plot



(a) 仿真试验结果 Simulation test results



(b) 物理试验结果 Physical test results

图 5 休止角仿真试验与物理试验结果对比

Fig.5 Comparison of simulation test and physical experiment results of repose angle

4 结论

1) 为得到茶毫在离散元仿真试验中的接触参数,通过物理试验测出茶毫的密度为 $265.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、平均茶毫粒径为 $231.374 \mu\text{m}$ 、休止角为 47.71° 。

2) 对显著性分析选出的 3 个参数(茶毫-茶毫恢复系数、茶毫-茶毫滚动摩擦系数、茶毫-不锈钢滚动摩擦系数)进行最陡爬坡试验,确定各参数最佳取值范围,通过 Box-Behnken 试验,得到这 3 个参数对休止角的二阶回归方程。

3) 以仿真休止角对实际休止角的相对误差最小值为目标,对数学回归方程进行寻优求解,得出最优参数组合:茶毫-茶毫恢复系数为 0.159、茶毫-

茶毫滚动摩擦系数为 0.290、茶毫-不锈钢滚动摩擦系数为 0.239。用最优参数组合进行离散元仿真试验得到休止角为 48.65° ,与物理试验休止角相对误差为 1.97%,表明离散元仿真试验标定的参数能很好地预测休止角。

参考文献:

- [1] 王罗云,何彩云,罗红梅,等.沙棘 7 个亚种与 26 个重要品种的遗传多样性[J].浙江农林大学学报,2019,36(4):670-677.
WANG L Y, HE C Y, LUO H M, et al. Genetic variation of 7 subspecies and 26 important cultivars in *Hippophae rhamnoides*[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(4): 670-677.
- [2] 宁志雪,牛广财,朱立斌,等.沙棘活性成分、生理功能及开发利用研究进展[J].食品与机械,2021,37(11):221-227,240.

- NING Z X, NIU G C, ZHU L B, et al. Research progress on the active compounds of sea buckthorn and their physiological functions and utilization[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 221-227, 240.
- [3] WANI T A, WANI S M, SHAH A G, et al. Optimizing conditions for antioxidant extraction from Sea Buckthorn leaf (*Hippophae rhamnoides* L.) as herbal tea using response surface methodology (RSM)[J]. International Food Research Journal, 2013, 20(4): 1677-1681.
- [4] 张程慧, 祁玉霞, 程康蓉, 等. 沙棘的综合价值研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 331-335.
- ZHANG C H, QI Y X, CHENG K R, et al. Advances on research and applications of *Hippophae rhamnoides* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 331-335.
- [5] ECCLESTON C, BAORU Y, TAHVONEN R, et al. Effects of an antioxidant-rich juice (sea buckthorn) on risk factors for coronary heart disease in humans[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2002, 13(6): 346-354.
- [6] 蒋小锋, 孙文胜, 李芳, 等. 沙棘叶雪菊复合茶饮料的研制[J]. 食品科技, 2014, 39(12): 128-132.
- JIANG X F, SUN W S, LI F, et al. Development of the sea buckthorn mixed snow chrysanthemum tea drinks[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(12): 128-132.
- [7] 刘勇, 廉永善, 王颖莉, 等. 沙棘的研究开发评述及其重要意义[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(9): 1547-1552.
- LIU Y, LIAN Y S, WANG Y L, et al. Review of research and development and significant effect of *Hippophae rhamnoides* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(9): 1547-1552.
- [8] 李月, 刘青, 王悦, 等. 沙棘叶的应用及现代研究进展[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(6): 1326-1332.
- LI Y, LIU Q, WANG Y, et al. Application and modern research progress of sea buckthorn leaves [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(6): 1326-1332.
- [9] 李小燕, 王林和, 李连国, 等. 沙棘叶片组织解剖构造与其生态适应性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 209-212.
- LI X Y, WANG L H, LI L G, et al. A study on the relation between tissue structure and ecological stability in seabuckthorn leaf [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(5): 209-212.
- [10] 向金田, 杨梅, 张强林, 等. 沙棘叶茶除毫装置设计与优化[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(5): 55-65, 76.
- XIANG J T, YANG M, ZHANG Q L, et al. Design and optimization of hair removal device for sea-buckthorn leaf tea [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(5): 55-65, 76.
- [11] 田剑锋, 石林榕, 杨小平, 等. 党参种子的离散元仿真参数标定与试验验证[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 240-249.
- TIAN J F, SHI L R, YANG X P, et al. Calibration and experimental validation of discrete element simulation parameters for *Codonopsis pilosula* seed[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 240-249.
- [12] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.
- LI Y X, LI F X, XU X M, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 320-327.
- [13] 罗帅, 袁巧霞, SHABAN G, 等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 343-350.
- LUO S, YUAN Q X, SHABAN G, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343-350.
- [14] SAKAI M, TAKAHASHI H, PAIN C C, et al. Study on a large-scale discrete element model for fine particles in a fluidized bed [J]. Advanced Powder Technology, 2012, 23(5): 673-681.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 粉尘物性试验方法: GB/T 16913-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods of dust character test: GB/T 16913-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [16] 张雪娟, 张欣, 王小莉, 等. 中国沙棘花形态结构的扫描电镜观察[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 7-13.
- ZHANG X J, ZHANG X, WANG X L, et al. Blossom anatomy of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* rousi [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 7-13.
- [17] 杜滨, 衣华, 部聪令, 等. 粉体性能对浓相气力输送特性的影响[J]. 中国粉体技术, 2008, 14(1): 50-55.
- DU B, YI H, BU C L, et al. Characterization of powder to assess dense phase pneumatic conveying [J]. China Powder Science and Technology, 2008, 14(1): 50-55.
- [18] 袁成宇, 王娟, 陈致水, 等. 片状体最小悬浮速度的计算模型[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 62-65.
- YUAN C Y, WANG J, CHEN Z S, et al. A calculation model for the minimum suspension velocity of a sheet [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 62-65.
- [19] 国家技术监督局. 表面活性剂 粉体和颗粒休止角的测量: GB 11986-1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- State Bureau of Technical Supervision. Surface active agents-powders and granules-mesurement of the angle of repose: GB 11986-1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [20] 国家技术监督局. 粉尘物性试验方法 第 5 部分: 安息角的测定 注入限定底面法: GB/T 16913.5-1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- State Bureau of Technical Supervision. Methods of dust character test part 5: determination of reposeful angle-poured angle of restrictive pile: GB/T 16913.5-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [21] WYPYCH P, COOK D, COOPER P. Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2005, 44(2): 323-326.
- [22] 冯晶晶, 郭建峰, 马心茹, 等. 超微粉碎对沙棘茶粉颗粒结构及理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 198-204.
- FENG J J, GUO J F, MA X R, et al. Effects of ultrafine grinding on powder structure and physicochemical properties of sea buckthorn tea [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 198-204.
- [23] 王维浩, 张莉莉, 李文杰, 等. 超微粉碎对小米粉理化特性的影

- 响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(5): 123-127.
- WANG W H, ZHANG L L, LI W J, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical properties of millet flour[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2015, 27(5): 123-127.
- [24] 白玉菱, 谢文影, 赵孟涛, 等. 基于 MATLAB 的 BP 神经网络的淀粉离散元接触参数标定[J]. 中国药理学杂志, 2022, 57(15): 1268-1277.
- BAI Y L, XIE W Y, ZHAO M T, et al. Contact parameter calibration of starch discrete element method based on BP neural network of MATLAB [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2022, 57(15): 1268-1277.
- [25] 李郁, 崔可源. 基于量纲分析方法的水平螺旋输送机离散元仿真研究[J]. 起重运输机械, 2021, (17): 36-40, 46.
- LI Y, CUI K Y. Discrete element simulation of horizontal screw conveyor based on dimensional analysis method[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2021, (17): 36-40, 46.
- [26] FENG Y T, OWEN D R J. Discrete element modelling of large scale particle systems-I: exact scaling laws[J]. Computational Particle Mechanics, 2014, 1(2): 159-168.
- [27] 周滨, 周岭, 万物, 等. 基于休止角试验的颗粒钾肥离散元模型参数标定[J]. 农机化研究, 2024, 46(1): 46-53.
- ZHOU B, ZHOU L, WAN C, et al. Parameter calibration of discrete element model of granular potassium fertilizer based on angle of repose test [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(1): 46-53.
- [28] 刘宏新, 赵一健, 解勇涛, 等. 有机肥侧抛装置螺旋叶片辅助辊轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 107-119.
- LIU H X, ZHAO Y J, XIE Y T, et al. Design and experiment of spiral blades auxiliary roller of organic fertilizer side throwing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 107-119.
- [29] 杨承剑, 黄兴国, 李伟, 等. Plackett-Burman 设计在益生菌生长主要影响因子筛选中的应用[J]. 饲料工业, 2007, 28(16): 31-33.
- YANG C J, HUANG X G, LI W, et al. Application of Plackett-Burman design in mostly influencing factor riddle of probiotic bacteria growth[J]. Feed Industry, 2007, 28(16): 31-33.

(上接第 271 页)

- [15] YAN P, LIN K R, WANG Y R, et al. Spatial interpolation of red bed soil moisture in Nanxiong Basin, South China[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2021, 242: 103860.
- [16] 刘燕楠, 孙贯芳, 毛威, 等. 基于地统计分析的河套灌区土壤水盐空间变异规律分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 101-109.
- LIU Y N, SUN G F, MAO W, et al. Geostatistical analysis of spatial variability of soil water and salt in Hetao Irrigation District [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 101-109.
- [17] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河, 等. 基于 GIS 和统计模型的黄土丘陵沟壑区土壤水分插值方法[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 93-96, 102.
- YAO X L, FU B J, LV Y H, et al. The soil moisture interpolation method based on GIS and statistical models in loess plateau region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 93-96, 102.
- [18] 辛明亮, 吕廷波, 何新林, 等. 玛河灌区膜下滴灌棉田表层土壤盐分空间变异性[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 74-79.
- XIN M L, LV T B, HE X L, et al. Spatial variation of surface soil salinity in under-film drip irrigating of cotton field in irrigated areas of Manas River Basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 74-79.
- [19] 谭师, 王全九, 罗小东, 等. 膜下滴灌前后表层土壤水分空间变异性[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 43-49.
- TAN S, WANG Q J, LUO X D, et al. The variability of surface layer soil water content under plastic mulch dripping before and after irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 43-49.
- [20] 丁宇, 张江辉, 白云岗, 等. 双膜条件下不同干播湿出水分处理对棉花生理、生长特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(4): 810-822.
- DING Y, ZHANG J H, BAI Y G, et al. Effects of different dry so-
- wing and wet-out water treatments on cotton physiology, growth characteristics and yield under double film conditions [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(4): 810-822.
- [21] 石聪, 陈礼瀚, 张怡菲, 等. 新疆小海子灌区耕地土壤盐渍化特征研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1314-1323.
- SHI C, CHEN L H, ZHANG Y F, et al. Soil salinization characteristics of cultivated land in Xiaohaizi Irrigation Area of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1314-1323.
- [22] GUAN Z L, JIA Z F, ZHAO Z Q, et al. Dynamics and distribution of soil salinity under long-term mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China [J]. Water, 2019, 11(6): 1225.
- [23] 徐英, 葛洲, 王娟, 等. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化与地下水埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 123-130.
- XU Y, GE Z, WANG J, et al. Study on relationship between soil salinization and groundwater table depth based on indicator Kriging [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 123-130.
- [24] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4684-4693.
- MA H H, YU T, YANG Z F, et al. Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4684-4693.
- [25] XU L, DU H R, ZHANG X L. Spatial distribution characteristics of soil salinity and moisture and its influence on agricultural irrigation in the Ili River Valley, China [J]. Sustainability, 2019, 11(24): 7142.
- [26] 李毅, 门旗, 罗英. 土壤水分空间变异性对灌溉决策的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 80-85, 90.
- LI Y, MEN Q, LUO Y. Effects of spatial variability of soil water on irrigation schedule [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(2): 80-85, 90.