

# 绣球菌子实体农艺指标动态模拟及三维重建研究

黄语燕, 王涛, 许浩斌, 蒲宝山, 陈永快

(福建省农业科学院数字农业研究所 福州 350003)

**摘要:** 为构建绣球菌子实体工厂化生长模型, 揭示绣球菌形态和产量的形成过程, 并实现绣球菌子实体三维可视化及表型参数的自动提取, 以闽绣 1 号为材料, 开展 2 次工厂化栽培试验。每隔 1 d, 手动采集绣球菌子实体农艺指标, 并在成熟期获取产量和子实体多视角图像数据。通过 SPSS 软件分析, 建立绣球菌子实体高度、长度、宽度、产量及整个菌包质量等农艺指标随生长天数的模型, 模型决定系数范围为 0.935~0.995, 经检验模型预测效果较好, 平均相对误差范围为 2.39%~8.09%。然后, 以绣球菌子实体的高度、长度、宽度为自变量无损地评估绣球菌生产过程的产量动态变化。最后, 基于绣球菌子实体多视角图片数据, 实现了绣球菌子实体三维可视化以及子实体高度、长度、宽度、表面积、体积等表型参数的自动提取, 三维模型算法计算值与人工测量值或者计算值相比, 平均相对误差均小于 14%, 为绣球菌高通量表型参数自动获取及优良新品种选育提供重要支撑。

**关键词:** 绣球菌; 农艺指标; 模型; 三维重建

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)08-092-08

## Dynamic simulation of agronomic indicators and three-dimensional reconstruction for fruiting bodies of *Sparassis crispa*

HUANG Yuyan, WANG Tao, XU Haobin, PU Baoshan, CHEN Yongkuai

(Institute of Digital Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, Fujian, China)

**Abstract:** In order to establish a factory growth model for fruiting bodies of *Sparassis crispa*, reveal the formation process of the morphology and yield of fruiting bodies of *S. crispa*, realize three-dimensional visualization and automatic extraction of phenotypic parameters. Minxiu No. 1 was used as experimental material, two factory cultivation experiments were carried out. The agronomic indexes of fruiting bodies of *S. crispa* were collected every 2 days, yield and multi-view image data were obtained at the maturity stage. Through SPSS software analysis, the model of the agricultural indicators such as the height, length, width, yield of fruiting bodies and mass of the whole *S. crispa* package with the growth days were established, the determination coefficients of the simulation model were between 0.935 and 0.995, the prediction effects were good, the mean relative errors ranged from 2.39% to 8.09%. Then, the yield of fruiting bodies of *S. crispa* were evaluated non-destructively by using the fruiting bodies height, length and width as independent variables. Finally, based on multi-view picture of fruiting bodies of *S. crispa*, three-dimensional visualization and the automatic extraction of the height, length, width, surface area, volume of fruiting bodies were realized, compared with manual measurements or calculated value, the mean relative errors were less than 14%, which provides important support for high-throughput phenotypic parameters obtained automatically and excellent new variety breeding of *S. crispa*.

**Key words:** *Sparassis crispa*; Agronomic indicator; Model; Three-dimensional reconstruction

绣球菌(*Sparassis crispa*)又名花椰菜菇、绣球菇、地花蘑、白地花、白绣球花,子实体肉质洁白细嫩,不仅味道鲜美、营养价值高,而且具有调节免疫、抗氧化、降血糖、降血脂、抗病毒等医疗和保健功效,是一种药食同源的大型真菌<sup>[1-3]</sup>。绣球菌属中

温型菌类,子实体直径 10~20 cm,单朵质量可达 250 g,其生长发育对环境的温度、湿度、光照、空气等要求相对较高<sup>[4-6]</sup>。2010 年,福建省农业科学院食用菌研究所通过多年技术攻关,绣球菌工厂化栽培工艺获发明专利,率先在全国成功实现绣球菌

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2024-05-09

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2020BBF03006);“5511”协同创新工程(XTCXGC2021015, XTCXGC2021021);福建省农业科学院项目(DKBF2024-07)

作者简介: 黄语燕,女,助理研究员,主要研究方向为农业数字化。E-mail: 644621043@qq.com

通信作者: 陈永快,男,副研究员,主要研究方向为数字农业与设施栽培。E-mail: 86467897@qq.com

工厂化栽培,并建立多个栽培基地,丰富了食用菌工厂化种植种类,有效提高了菌菇种植效益<sup>[5-6]</sup>。

食用菌模拟模型是优化栽培管理、辅助生产环境调控和实现栽培管理标准化的有力工具<sup>[6]</sup>。袁俊杰<sup>[7]</sup>研究了鸡腿菇子实体直径、高度、质量与温度及湿度的关系,建立了基于温度和湿度的鸡腿菇动态生长速率模型。于海龙<sup>[8]</sup>构建基于温度和湿度的杏鲍菇产量模型以及基于温度和湿度的杏鲍菇子实体生长发育模型。薛雨<sup>[9]</sup>通过机器视觉技术得到香菇菌盖高度、菌盖直径、菌柄高度、菌柄直径等随时间变化的关系曲线。张康<sup>[10]</sup>建立菌丝在不同的温度、湿度、CO<sub>2</sub>浓度条件下,生长速度随时间变化的数学模型,并经验证模型精度较高。目前,我国食用菌模型在杏鲍菇、鸡腿菇、香菇中研究较多,同时将机器视觉技术用于相关研究,强化了研究的便捷性和准确性。周军等<sup>[11]</sup>采用机器视觉的方法对杏鲍菇的原基数目进行统计,并建立了原基速率的数学模型。胡东等<sup>[12]</sup>利用图像处理技术对猪肚菇菌落图像进行处理,提取菌落大小、形状和纹理等相关的14个表型指标。陈燕等<sup>[13]</sup>利用VGG-UNet模型,获取香蘑菌丝体分割图像,并利用OpenCV获取菌丝体的半径、面积、周长、圆整度、覆盖度等,实现食用菌菌丝体表型参数自动测量。

近年来,绣球菌栽培发展较快,目前我国绣球菌工厂化栽培鲜品每天产量超过20 t,有效提升了种植效益<sup>[14]</sup>。目前,国内对绣球菌的研究多集中在绣球菌液体菌种培养、栽培基质配方、环境参数调控等方面,而针对绣球菌工厂化生长模型缺乏研究,未见明确的子实体生长动态数学模型及三维可视化的研究报道<sup>[15]</sup>。农艺指标是绣球菌生长发育的重要参数,对评价绣球菌生长情况、采收决策及菇房管理等具有重要意义。因此,定量分析绣球菌生产过程中农艺指标的动态变化,有利于揭示绣球菌形态和产量的形成过程,亦可作为绣球菌生产决策的参考依据。开展绣球菌子实体三维可视化及表型参数自动提取研究,可为绣球菌种质资源可视化三维保存及展示、高通量表型参数自动获取及新品种选育提供重要支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与设 计

试验于2022年5—9月在福建容益菌业科技研发有限公司(国家级农业产业化重点龙头企业)全控型工厂化栽培环境中进行,供试品种为闽绣1

号。采用袋式栽培方法,选用355 mm×172 mm×0.05 mm的聚丙烯塑料袋,装培养基料约0.9 kg(湿料,配方为:松木屑80%、面粉8%、马铃薯粉5%、玉米粉5%、其他辅料2%),培养基料经过高压灭菌(126 °C、150 min),冷却后接种并移入培养库房内,进行菌丝培养,菌丝培养温度20~22 °C,培养期间注意通风换气,待原基不断增大形成子实体并至乒乓球大小后,菌袋移入出菇室进行出菇管理。

2022年7—9月在同一个出菇房内开展2次子实体栽培试验,在子实体长大至乒乓球大小后开始采样,待子实体成熟后采样结束。出菇房温室控制和栽培管理措施均按工厂化栽培规范进行,温度控制在18~20 °C,空气湿度控制在90%~95%,采菇前湿度控制在80%~85%,菇房中二氧化碳质量浓度控制在600~1000 mg·L<sup>-1</sup>,光照度控制在800~1000 lx。

### 1.2 测定项目与方 法

第1次试验时间为2022年7月29至8月20日,第2次试验时间为2022年9月1—21日,试验期间每隔1 d测量1次绣球菌的农艺指标。试验前固定4袋菌株,每次测量绣球菌整个菌包质量以及子实体高度、长度、宽度,再挑选长势较均匀的3袋绣球菌进行破坏性取样,获得绣球菌子实体产量。菌包质量为整个栽培袋质量,包含下部培养基料和上部子实体质量,测量时直接把菌袋放置于电子天平上称质量。子实体高度为绣球菌子实体底部到子实体最顶端的高度。子实体长度和宽度为子实体投影面的最大长度和宽度。子实体产量为绣球菌单个菌包可食用部分质量,测量时把绣球菌子实体从菌袋上取下,切去子实体底部的培养基和不可食用部分后称质量。质量数据用电子天平(常熟市双杰测试仪器厂JJ223BC型)进行称量,子实体高度、长度、宽度用数显游标卡尺(上海美耐特实业有限公司MNT-200)进行测量。所有测定数据均取平均值后进行分析。其中第1次试验数据用于建立农艺指标动态模型,第2次试验数据用于验证模型。

在第2次试验中,待子实体成熟后(2022年9月21日),在菇房内随机选取6袋绣球菌放置于多视角图像采集平台上获取绣球菌多视角图片,应用运动恢复结构法对图像进行三维重建,并通过算法获取绣球菌子实体高度、长度、宽度、表面积、体积等表型参数。最后,手动测量6袋绣球菌子实体高度、长度、宽度等农艺指标,并与自动获取的子实体表型参数进行精度分析。

采用Microsoft Excel 2013和IMB SPSS Statis-

tics 19 进行子实体农艺指标动态模拟数据处理和分析。同时,绘制模拟值与实测值的 1:1 关系图,模型精度利用模拟值与实测值之间的决定系数  $R^2$  (公式 1)、均方根误差 RMSE (公式 2)、平均绝对误差 MAE (公式 3)、平均相对误差 MRE (公式 4) 进行评估分析。 $R^2$  越趋近于 1 模型精度越高, RMSE、MAE、MRE 值越小,模型的模拟结果越可靠<sup>[4]</sup>。

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs,i})^2}; \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mod,i})^2}{n}}; \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{obs,i} - X_{mod,i}|; \quad (3)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{obs,i} - X_{mod,i}}{X_{obs,i}} \right| \times 100\%。 \quad (4)$$

式中,  $X_{obs,i}$  为实测值,  $X_{mod,i}$  为预测值,  $n$  为样本容量。

### 1.3 三维重建及特征提取方法

搭建多视角图片采集平台,获取子实体成熟期不同角度的图片数据。采集平台主要由 PLC、旋转步进电机、2 个工业相机等硬件设备组成。PLC 通过控制旋转步进电机使旋转台转动,当转台旋转后,PLC 控制旋转台停止转动并传送信号给工业相机完成拍照动作后继续转动,实现固定角度图像获取及传输。图像采集由安装高度不同、角度不同的工业相机作为采集设备,使工业相机分别在绣球菌上下层、以不同倾斜角度围绕着绣球菌进行 360° 旋转拍摄(每层拍摄 30 张图片),并将图片传输到上位机。多视角图片采集平台示意图见图 1。

将得到的图片运用多视角立体视觉(MVS)和运动恢复结构(SFM)技术对植株进行三维重建<sup>[16]</sup>。利用距离最值遍历、投影三角化等算法获取绣球菌子实体高度、长度、宽度、投影面积、体积等表型参

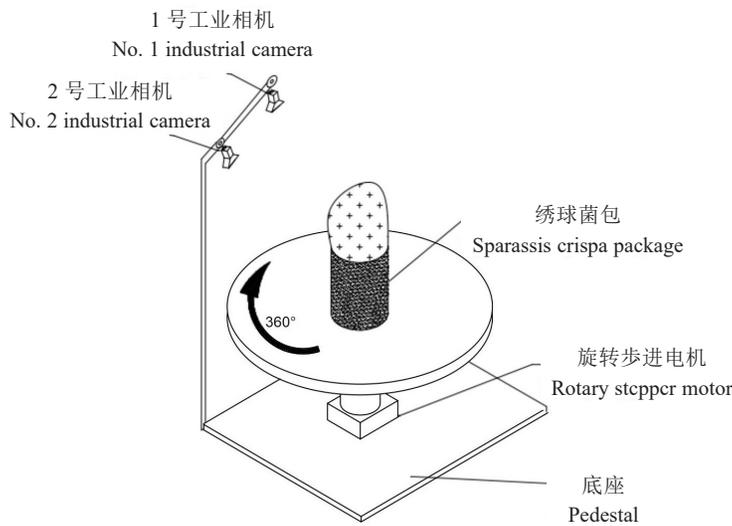


图 1 多视角图片采集平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-view image acquisition platform

数,并与人工测量值或计算值进行对比来评价三维重建方法的精度<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 子实体农艺指标模型构建及验证

根据 2 次试验数据,利用 EXCEL 作出子实体生长指标与生长时间的散点图(图 2),可知绣球菌在生长过程中,随着时间的增加,绣球菌菌包质量呈下降趋势,这可能与菌包营养物质消耗、水分降低等有关。绣球菌子实体高度、长度、宽度大致呈

由慢到快的增长趋势。绣球菌产量大致呈由慢到快的增长趋势,到达峰值后略有下降。

利用 SPSS 软件对第 1 次试验数据进行曲线回归分析,依次选择线性、二次多项式曲线、Logistic 模型、指数函数、“S”模型、倒数模型等函数,并从中选取决定系数最高的模型作为最终模型。通过数据分析得出绣球菌菌包质量( $W_{菌包}$ )、子实体高度( $H$ )、子实体长度( $L$ )、子实体宽度( $W$ )、产量( $Y$ )等农艺指标与生长时间( $t$ )之间以二次多项式曲线模型拟合效果最优,曲线决定系

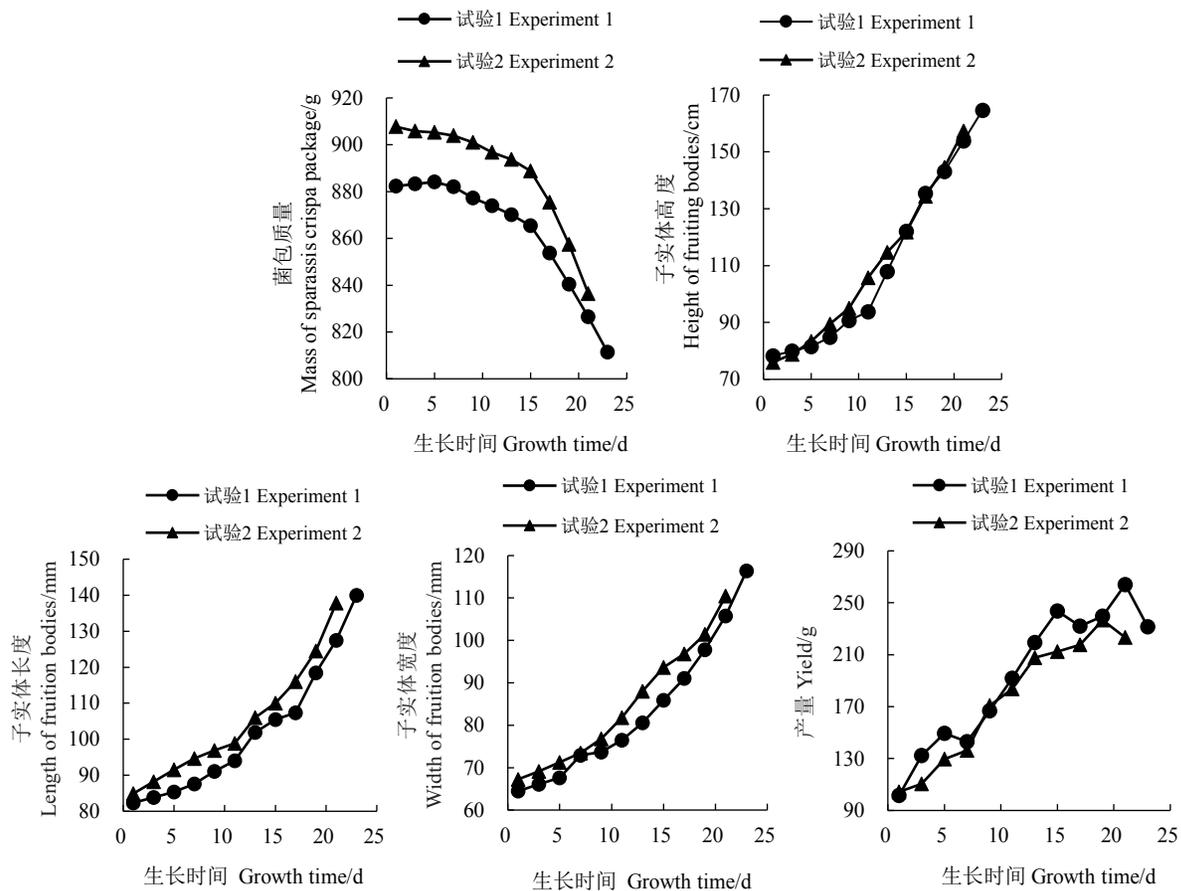


图2 散点图

Fig. 2 Scatter plot

数 ( $R^2$ ) 为 0.935~0.995, 模型关系式及决定系数如表 1 所示。根据产量模型, 生长时间为 25.65 d 时, 产量达到最大值 252.14 g。因此要把握绣球菌最佳采摘期, 延长采摘期会导致产品商品性降低。

用第 2 次试验数据对各模型进行验证。模型模拟值与实测值之间基于 1:1 直线如图 3 所示, 菌包质量、子实体高度、长度、宽度、产量的模型模拟值与实测值的  $R^2$  分别为 0.971、0.996、0.986、0.987、

0.966, RMSE 分别为 21.85 g、3.73 mm、5.99 mm、4.49 mm、14.89 g, MAE 分别为 21.32 g、3.14 mm、5.63 mm、4.17 mm、13.08 g, MRE 分别为 2.39%、2.73%、5.36%、2.39%、8.09%, 说明模型预测效果较好, 精度较高, 可以较好地体现绣球菌子实体生长过程的特征变化。

### 2.2 子实体产量非破坏性估测

根据 2 次试验数据分别作出子实体高度、长

表 1 模型关系式及决定系数

Table 1 Model relationship and determination coefficient

项目 Project	关系式 Relational expression	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )
菌包质量( $W_{\text{菌包}}$ )模型 Mass of <i>Sparassis crispa</i> package model	$W_{\text{菌包}} = -0.216 t^2 + 2.077 t + 878.987$	0.995
子实体高度( $H$ )模型 Model of fruiting bodies height	$H = 0.153 t^2 + 0.529 t + 75.629$	0.988
子实体长度( $L$ )模型 Model of fruiting bodies length	$L = 0.115 t^2 - 0.294 t + 83.627$	0.990
子实体宽度( $W$ )模型 Model of fruiting bodies width	$W = 0.093 t^2 - 0.021 t + 65.573$	0.994
产量( $Y$ )模型 Yield model	$Y = -0.253 t^2 + 12.978 t + 85.704$	0.935

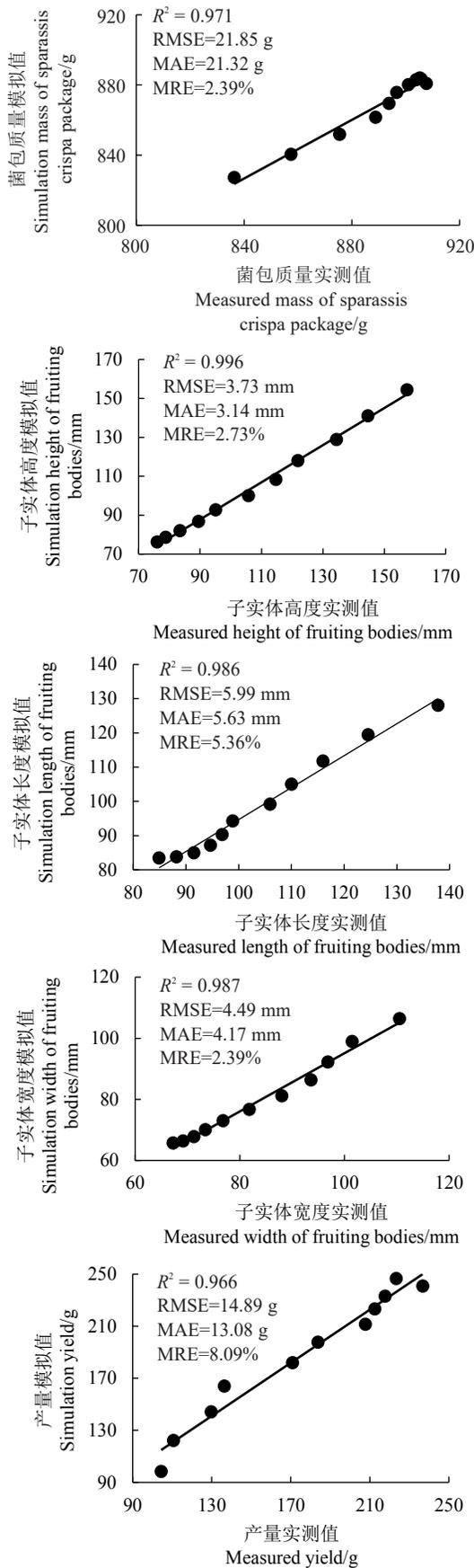


图3 农艺指标实测值与模型模拟值比较图

Fig. 3 Comparison chart of measured value and simulated value of agronomic index model

度、宽度等和产量的散点图,由图4可以看出,虽然随着时间的增加绣球菌子实体的长度、宽度、高度等性状值呈增加趋势,但是子实体产量会呈现降低趋势。一方面,采摘前菇房会降低环境湿度,不及时采摘,子实体的含水率会降低;另一方面,子实体产量为绣球菌可食用部分质量,虽然随着时间的增加绣球菌子实体的长、宽、高等性状还会呈增加趋势,但是子实体基部不可食用部分会增加,导致商品率降低,产量也相应降低。

采用 SPSS 软件对第 1 次试验数据进行回归分

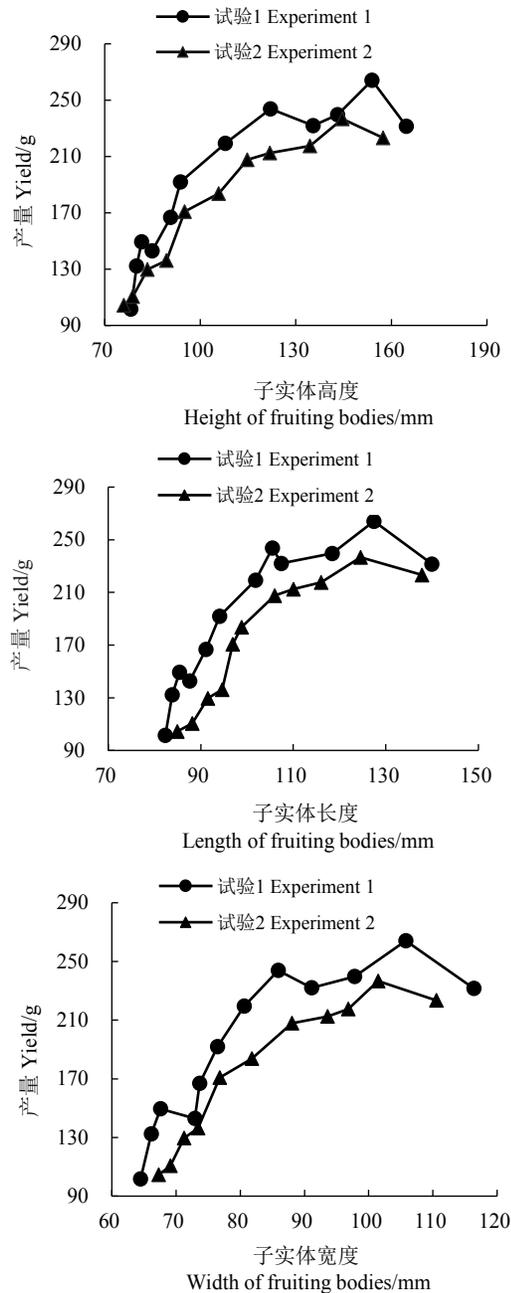


图4 绣球菌表型参数与产量的散点图

Fig. 4 Scatter plot of phenotypic parameters and yield of *Sparassis crispa*

析,得到最优曲线关系式及曲线决定系数( $R^2$ )如表2所示,子实体高度、长度、宽度与产量之间均为二

次函数关系,曲线决定系数( $R^2$ )为0.939~0.967。

用第2次试验数据对模型进行验证,结果表

表2 曲线关系式及决定系数

Table 2 Curve relationship and determination coefficient

项目 Project	关系式 Relational expression	决定系数( $R^2$ ) Coefficient of determination
基于子实体高度( $H$ )的产量模型 Yield model based on fruiting bodies height ( $H$ )	$Y=-0.033 H^2+9.199 H-398.282$	0.946
基于子实体长度( $L$ )的产量模型 Yield model based on fruiting bodies length( $L$ )	$Y=-0.087 L^2+21.397 L-1055.328$	0.967
基于子实体宽度( $W$ )的产量模型 Yield model based on fruiting bodies width( $W$ )	$Y=-0.102 W^2+20.727 W-802.974$	0.939

明,预测值与实际值之间相关性较好。模型模拟值与实测值之间基于1:1直线如图5所示。基于子实体高度、长度、宽度的产量模型模拟值与实测值的 $R^2$ 分别为0.982、0.958、0.984, RMSE分别为20.79、33.33、28.81 g, MAE分别为19.37、31.56、28.21 g, MRE分别为11.23%、20.58%、17.69%,从数据分析结果可以看出,基于子实体高度的产量模型模拟精度略高于其他两种模型。

### 2.3 绣球菌子实体三维重建及表型参数精度分析

2.3.1 绣球菌子实体三维重建及表型参数提取 通过拍摄绣球菌多视角图像数据,运用openMVG和openMVS算法获取三维点云,整个过程如图6所示,包括:特征提取→特征匹配→增量式sfm→稀疏点云→密集点云→网格。密集点云通过下采样、滤波去噪、坐标转换等,获得完整的准确的绣球菌三维模型并利用距离最值遍历得到子实体高度、长度、宽度。绣球菌网格切割、补洞后,通过投影三角化算法获取表面积、体积等参数。

2.3.2 精度分析 由于绣球菌子实体体积和表面积无法人工直接测量,因此采用图形近似法,用已测量的数据通过计算获取。考虑到绣球菌的形态特征,把绣球菌拟合成一个椭圆柱,用子实体长度( $L$ )的一半为椭圆长轴和宽度( $W$ )的一半为椭圆短轴,高度( $H$ )为椭圆柱的高。

将三维重建获取的子实体高度、长度、宽度、表面积、体积等参数,与人工测量值或计算值进行对比来评价三维重建方法的精度。测量结果精度用均方根误差RMSE、平均绝对误差MAE、平均相对误差MRE进行评估分析,人工测量值或计算值和算法测量值的比较见表3,三维模型算法测量值结果与人工测量值相比,子实体高度、长度、宽度、体积、表面积的平均绝对误差分别为8.31 mm、8.32 mm、6.57 mm、125.98 mm<sup>3</sup>、102.75 mm<sup>2</sup>,平均绝对误差分

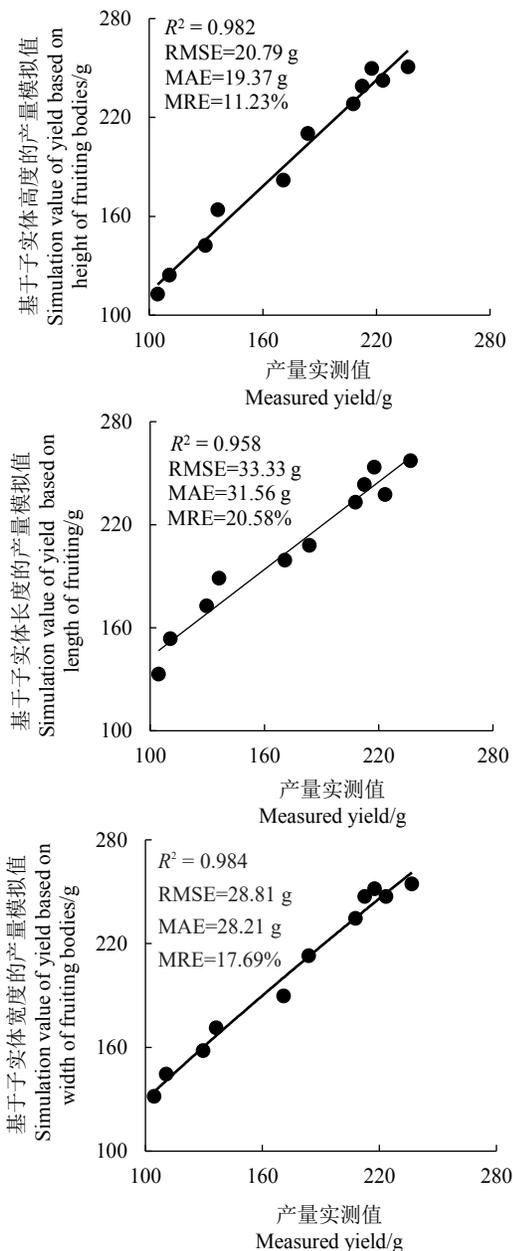


图5 产量模拟值与实测值比较图

Fig. 5 Comparison chart of simulated value and measured value of yield model

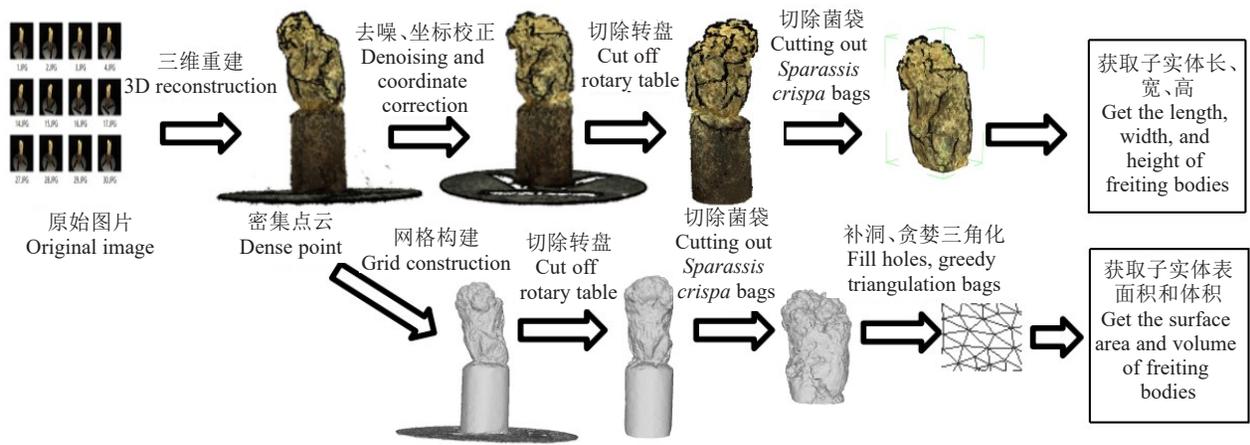


图6 绣球菌三维重建及表型参数提取过程

Fig. 6 Process diagram of 3D reconstruction and phenotypic parameters extraction of *Sparassis crispa*

别为 7.41 mm、7.28 mm、6.05 mm、107.59 mm<sup>3</sup>、95.29 mm<sup>2</sup>，平均绝对百分比误差分别为 4.43%、5.93%、5.64%、11.77%、13.84%。以上结果表明通过拍摄多视角图像，生成绣球菌三维点云模型来获取绣球菌的表型参数是可行的，可为绣球菌栽培管理、菌种研究提供数字化测量手段。

表3 人工测量值和算法测量值的比较  
Table 3 Comparison of manual and algorithmic measurements

项目 Project	RMSE	MAE	MRE/%
子实体高度 Height of fruiting bodies/mm	8.31	7.41	4.43
子实体长度 Length of fruiting bodies/mm	8.32	7.28	5.93
子实体宽度 Width of fruiting bodies/mm	6.57	6.05	5.64
子实体体积 Volume of fruiting bodies/mm <sup>3</sup>	125.98	107.59	11.77
子实体表面积 Surface area of fruiting bodies/mm <sup>2</sup>	102.75	95.29	13.84

### 3 讨论与结论

随着食用菌产业的发展，相关模型的研究成为热点，内容涉及环境控制模型<sup>[18]</sup>、价格预测<sup>[19]</sup>等，但对于子实体生长模型的研究目前尚处于起步阶段，未形成类似 CERES(crop environment resource synthesis)的作物模拟模型体系<sup>[20]</sup>。

模型的建立可为绣球菌的工厂化栽培管理提供理论数据，通过对不同时期的表型特征进行预测，有助于提高产量并增强生产的稳定性。笔者以生长时间为尺度建立了绣球菌农艺指标动态模拟模型，模型以二次多项式曲线拟合效果最优，曲线

决定系数( $R^2$ )为 0.935~0.995，模型精度较高。该模型能较好地预测子实体在工厂化环境中逐日变化情况，为绣球菌节能高效栽培提供了参考依据。这与夏燕等<sup>[20]</sup>对花菇子实体模拟模型的研究结果类似。根据绣球菌产量模型，生长时间为 25.65 d 时，产量达到最大值为 252.14 g，此后产量呈一定的负增长。因此要把握绣球菌最佳采摘期，在菌袋移入出菇室 25~26 d 采摘最佳，延长采摘期会导致产品商品性降低，这与陈岗等<sup>[21]</sup>对银耳子实体的研究结果类似，银耳子实体生长速率随生长时间变化呈上升的趋势，在 21 d 左右子实体的直径和单体质量达到最大值，此后生长速率趋缓或出现负增长。

产量是绣球菌经济价值的直接体现，因此，无损地评估绣球菌生产过程的产量动态变化，实现对绣球菌产量积累的动态监测，可作为绣球菌生产决策的参考依据。利用绣球菌表型性状估测产量是一种无损的方法，子实体长度、高度、宽度测定方法简便，因此成为产量非破坏性估测中较广泛使用的方法。于海龙<sup>[8]</sup>研究表明，杏鲍菇质量贡献最大的是菌盖直径和菌柄长度两个性状。徐方媛等<sup>[22]</sup>通过研究黄伞性状与子实体质量之间的关系，结果表明，对于子实体质量直接作用由大至小依次为菌柄长度、菌盖直径、菌盖厚度、菌柄直径，因此菌柄长度对子实体质量的间接促进作用最大。笔者的试验利用子实体高度、长度、宽度为自变量，建立子实体产量的模拟模型。基于子实体高度、长度、宽度的产量模型模拟值与实测值的  $R^2$  分别为 0.982、0.958、0.984，经检验模型预测效果较好。通过测量绣球菌的子实体高度、长度、宽度就可以预测绣球菌的鲜质量特征，其中，基于子实体高度的产量模

型模拟精度略高于其他两种模型,这与于海龙<sup>[8]</sup>、徐方媛等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。

在绣球菌菌种选育过程中需要获取高通量子实体形态学数据,目前数据的获取通常通过人工测量的方法,存在速度慢、主观性强、成本高、接触菌包、影响生长等问题。通过拍摄多视角图像数据,运用 openMVG 和 openMVS 算法获取三维点云,建立绣球菌三维模型,并利用算法获取绣球菌子实体高度、长度、宽度、表面积、体积等参数,实现非接触获取表型参数。三维模型算法测量值结果与人工测量值相比,子实体高度、长度、宽度的均方根误差分别为 8.31 mm、8.32 mm、6.57 mm、125.98 mm<sup>3</sup>、102.75 mm<sup>2</sup>,平均绝对误差分别为 7.41 mm、7.28 mm、6.05 mm、107.59 mm<sup>3</sup>、95.29 mm<sup>2</sup>,平均绝对百分比误差分别为 4.43%、5.93%、5.64%、11.77%、13.84%。误差的主要原因是绣球菌不是规则图形,人工测量过程中测量位置的判别比较主观以及子实体体积和表面积计算采用图像近似法,图像近似法本身就与真实值存在较大的误差。但是,子实体高度、长度、宽度、表面积、体积的平均绝对百分比误差均控制在 14%以内。

本研究存在一定的不足之处,试验仅仅采集了 2 次试验数据,数据量还不够多,未来应加大数据量的采集,进一步提高模型的精度、增强适用性。对于子实体体积和表面积的测量使用了图形近似法,误差较大,在以后研究中可考虑采用商业化软件的计算值与笔者试验的测量值作对比。另外笔者的研究是在最优环境下建立的绣球菌模型,未考虑到环境胁迫对食用菌生长的影响,未来可对绣球菌在胁迫环境下的生长模型做进一步的研究。

笔者建立了绣球菌子实体农艺指标随时间的动态变化模型,实现子实体产量非破坏性估测,并开展绣球菌子实体三维可视化及表型参数自动提取研究,为绣球菌出菇管理、生产环境调控、产量的无损评估、绣球菌种质资源可视化、高通量表型参数自动获取提供数据支撑及参考。

### 参考文献

- [1] 马璐,杨驰,肖冬来,等. 基质碳氮比对广叶绣球菌生长发育的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3196-3213.
- [2] 应正河,林衍铨,马璐,等. 不同光质光量对绣球菌菌丝生长及原基形成的影响[J]. 福建农业学报, 2013, 28(6): 538-540.
- [3] 毕书瑜,崔芳铭,侯江燕,等. 广叶绣球菌多糖-白藜芦醇纳米粒子的制备、表征及其体外抑制  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性[J/OL]. 菌物学报, 1-16[2024-05-07]. <https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.230317>.
- [4] 杨丽莉. 绣球菌液体菌种培养及栽培基质配方研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [5] 王斌,桑亚姣,张腾霄,等. 绣球菌化学成分、人工栽培和液体发酵研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34(4): 59-64.
- [6] 耿缘. 绣球菌栽培关键参数研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [7] 袁俊杰. 食用菌生长模型及栽培室环境控制系统研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2007.
- [8] 于海龙. 可控环境下杏鲍菇子实体发育模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [9] 薛雨. 基于机器视觉技术的食用菌成长过程监控系统研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [10] 张康. 杏鲍菇菌丝生长期关键环境因子的调控策略研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [11] 周军,丁文捷,朱学军,等. 基于机器视觉的不同湿度下杏鲍菇原基形成速率评估(英文)[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(2): 262-272.
- [12] 胡冬,袁涛,于海龙,等. 基于数字图像处理技术的猪肚菇菌落表型性状分析[J]. 食用菌学报, 2022, 29(3): 32-40.
- [13] 陈燕,陆嘉豪,胡小春,等. 基于 VGG-UNet 的食用菌菌丝体表型参数自动测量方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 233-240.
- [14] 刘晓瑜,马璐,杨驰,等. 绣球菌工厂化栽培研究进展[J]. 中国食用菌, 2024, 43(1): 97-104.
- [15] 刘晓瑜,马璐,杨驰,等. 脂肪酸及表面活性剂对广叶绣球菌液体培养的作用研究[J]. 食药用菌, 2022, 30(3): 226-232.
- [16] 梁秀英,周风燃,陈欢,等. 基于运动恢复结构的玉米植株三维重建与性状提取[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 209-219.
- [17] 周风燃. 基于 SfM 的玉米植株三维重建和特征提取方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [18] 林静,赵萍,何莉莉,等. 食用菌工厂化生产环境控制模拟模型的研究[J]. 农机化研究, 2007(10): 61-64.
- [19] 赵忠玲,王笑. 基于神经网络的食用菌价格预测模型的建立[J]. 中国食用菌, 2020, 39(3): 168-170.
- [20] 夏燕,王成晨,张健,等. 优质香菇(花菇)子实体生长模型的研究[J]. 食药用菌, 2024, 32(1): 40-46.
- [21] 陈岗,周瑶,詹永,等. 基于温湿度变化的银耳子实体生长发育非线性模拟模型研究[J]. 北方园艺, 2019(7): 140-148.
- [22] 徐方媛,陈涛,黄伞子实体性状与产量的关系研究[J]. 天津农业科学, 2020(12): 12-14.