

面向机器人采摘的番茄力学特性试验

刘继展, 李萍萍, 李智国, 毛罕平

(现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 江苏省重点实验室, 江苏大学农业工程研究院, 镇江 212013)

摘 要: 番茄果实及果梗的力学特性, 是采摘机器人设计与控制的重要依据。对不同成熟期的番茄果实进行了纵向和横向挤压试验, 对其果梗进行了折断和拉断试验。试验表明番茄果实的抗挤压能力具有明显的各向异性, 且从青果期至绿熟期达到最大, 而后随着成熟度增加而迅速减小。利用简化结构对这一规律的力学原理进行了分析。果梗拉断和折断试验发现, 果梗均从离层处断裂, 与拉断相比, 折断方式更省力和易于实现机器人采摘。

关键词: 采摘机器人, 力学特性, 番茄, 成熟度

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0066-05

刘继展, 李萍萍, 李智国, 等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 66—70.

Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 66—70.(in Chinese with English abstract)

0 引 言

番茄是广受欢迎的蔬菜之一, 其全球产量超过 1.2 亿 t, 作为第三大生产国, 中国番茄年产量已超过 3700 万 t。在番茄生产中, 采摘作业约占其总劳动量的 40% 左右, 采摘作业的自动化对于解放劳动力、促进番茄集约化生产具有重要的意义。日本和欧美发达国家自 20 世纪 80 年代就开始了番茄采摘机器人的研究。近年来, 番茄采摘机器人的研究也开始成为热点。

采摘机器人作业时, 一般先对果实进行可靠抓持, 再通过拉断或折断果梗等方式将果实从植株上分离。作为对果蔬直接接触作业的设备, 采摘机器人的动作原理与方案、结构与运动参数、控制策略等都必须根据作业对象的特性来确定。因而对番茄果实及果梗力学特性的研究, 可以为采摘机器人的设计与控制提供依据。

多年来, 国内外学者主要针对水果、蔬菜储运过程中的碰撞、跌落损伤等问题, 对各类水果、蔬菜的力学特性进行了研究。P.A.Idah 按转红期、全红期对番茄从不同高度跌落至不同表面的损伤情况进行了分析^[1]。Van linden 通过试验揭示了温度、成熟度、生长季节对番茄碰伤的影响规律^[2]。R.K. Goyal 用探头压缩法测定了印度醋栗的力—变形规律及其与被煮时间的关系^[3]。Krishna K. Singh 应用平板压缩法对采后 10 d 的桔子进行了压缩试验^[4]。王荣、李成通过对番茄的平板压缩试验, 认为其挤压力—变形曲线呈 S 型, 并具有各向异性特征^[5-8]。周会玲通过试验发现葡萄果柄耐拉力与果柄、果蒂、果刷尺寸有关, 葡萄浆果耐压力与果肉质地和果粒细胞有关^[9]。李小昱则发现苹果的力学特性与压缩时的加载速

率和压头型式有关^[10]。

本文对与采摘机器人设计、控制直接相关的番茄果实的抗挤压特性、果梗的拉断与折断特性进行了试验研究, 得到了不同加载方向、不同成熟度下番茄果实的挤压力—变形规律, 并首次应用简化力学结构分析了这一规律的力学原理。同时通过果梗的折断和拉断试验, 并结合果实的耐挤压能力, 对机器人采摘的不同方式进行了对比。

1 番茄果实挤压试验

1.1 材料与方法

1.1.1 试验材料与试验设备

试验于 2007 年 10 月底在农业装备与技术重点实验室进行。所选用材料为金棚 1 号番茄, 采自南京军区镇江蔬菜基地。实际生产中为方便贮藏和运输, 番茄多在绿熟期采摘, 就地销售和加工可选择初熟期和半熟期采摘。故根据成熟度, 选取青果期、绿熟期、初熟期、半熟期番茄各 20 个, 番茄的横向、纵向直径范围分别为 56.2~91.5 mm 和 53.8~78.5 mm。试验在 WDW30005 型微控电子万能试验机上进行, 精度±0.5%, 分辨率±1/120000, 可由微机自动控制加载与卸载并自动完成数据采集。图 1 为该试验机及其加载情况。

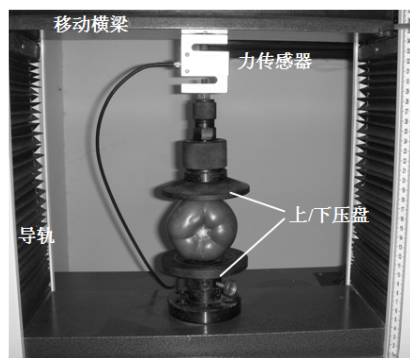


图 1 微控电子万能试验机

Fig.1 PC-control electronic universal testing machine

收稿日期: 2007-12-07 修订日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50805067); 江苏省现代农业装备与技术重点实验室开放基金资助项目 (NZ200704)

作者简介: 刘继展 (1976—), 男, 河北衡水人, 博士生, 主要从事农业机器人、农业智能化装备的研究。镇江 江苏大学农业工程研究院, 212013。Email: liujizhan@163.com

1.1.2 试验方法

试验采用平板压缩方式，由上下压盘加载，选择 1 kN 量程力传感器，加载速率设定为 0.25 mm/s。不同成熟度果实随机分为两组，每组 10 个，分别进行纵向（果实轴线方向）和横向挤压（垂直轴线方向）试验。

1.2 试验结果与分析

1.2.1 番茄果实的挤压力—变形规律

对不同成熟度番茄分别进行的纵向、横向挤压试验表明，其挤压力与变形量之间具有相似的曲线关系（图 2），即从开始挤压至果皮出现裂纹阶段，挤压力与变形

量近似直线关系；破裂后挤压力仍持续上升至一定峰值，而后骤然下降；待变形量足够大时，挤压力又剧烈上升。挤压过程中无明显生物屈服点出现。

1.2.2 果实抗挤压能力与加载方向的关系

番茄果实的纵向、横向挤压强度差异较大，具有明显的各向异性特征。如图 2 和表 1 所示，同一成熟度下番茄的纵向挤压破裂力、挤压力峰值均明显大于横向，其相应变形量也大于横向，表明番茄的纵向抗挤压能力显著超过横向。

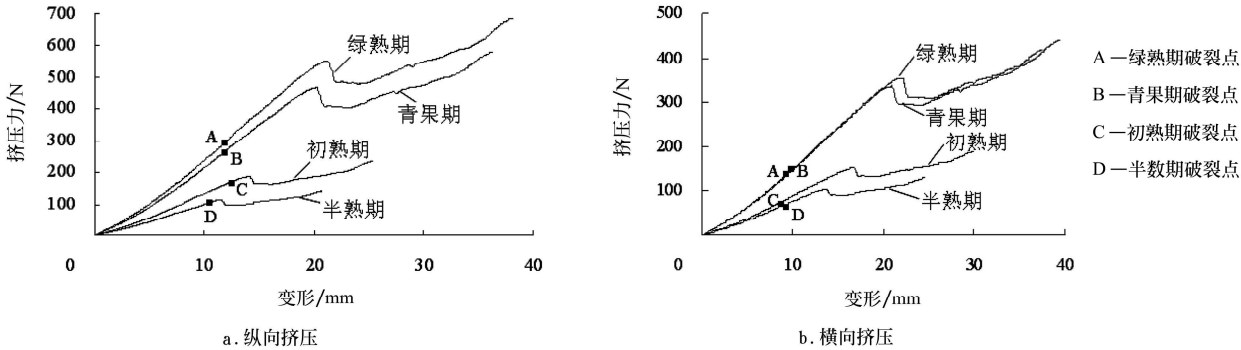


图 2 番茄果实挤压力—变形曲线
Fig.2 Force-deformation curve for tomato fruits under compression

表 1 番茄果实挤压破裂力与破裂变形

Table 1 Peak rupture force and rupture deformation for tomato fruit under compression

	青果期		绿熟期		初熟期		半熟期	
	破裂力/N	破裂变形/mm	破裂力/N	破裂变形/mm	破裂力/N	破裂变形/mm	破裂力/N	破裂变形/mm
纵向	265.33	11.96	308.99	11.98	179.56	12.78	106.51	10.70
横向	143.08	9.001	155.27	9.64	80.68	8.34	72.52	9.03

纵向加载时，当载荷达到最大挤压破裂力时，果皮均沿纵向出现细微裂纹，裂纹随载荷增加而逐渐增大，直至完全破坏；横向加载时，裂纹一般首先出现在果蒂周围放射性延伸的凹纹处（图 3）。

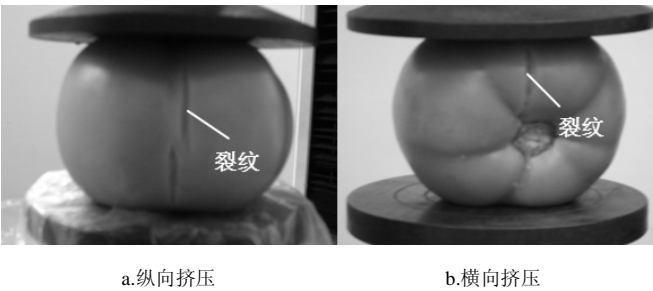


图 3 不同加载方向的裂纹形式
Fig.3 Crack under different compression directions

1.2.3 果实抗挤压能力与成熟度的关系

由图 2 及表 1 可以看出，不同成熟度番茄果实的抗挤压能力具有明显差异。无论纵向和横向加载，不同成熟度果实出现裂纹时刻的挤压变形量相近，但挤压破裂力相差很大。不同成熟度番茄果实的挤压破裂力与峰值力的比值 F_R/F_P 亦具有明显差异。在绿熟期和青果期，当

表皮出现破裂后，果实仍维持较强的抗挤压强度，在达到较大变形量后挤压力才到达峰值；而初熟期和半熟期，果皮破裂后挤压力很快达到峰值。挤压破裂力和挤压峰值力均有如下关系：

绿熟期 > 青果期 > 初熟期 > 半熟期

而挤压破裂力与峰值力的比值 F_R/F_P 则恰恰反之：

绿熟期 < 青果期 < 初熟期 < 半熟期

1.3 番茄果实挤压特性的力学依据

1.3.1 番茄果实挤压强度与成熟度的关系

番茄果实的抗挤压能力除了与外果皮的强度有关以外，主要由果实的内部构造决定。其果皮由外果皮、中果皮、内果皮组成，中果皮肉质多浆，通常由数层组成；果实内部由与中果皮和果心相联结的隔壁分为 5~8 个子房室，子房室发育而成胎座，胎座内着生种子，种子周围由一层胶状物包围（图 4a）。

果实的横切面具有近似轮式的受力结构（图 4b），其中果皮、隔壁和果心分别对应于轮缘、轮辐和轮毂。从青果期至绿熟期，果实内部结构逐步发育完整，轮式结构承载能力达到最大；随着成熟度增加，果心及隔壁不断流质化，轮式结构中轮辐及轮毂功能迅速消失，而中

果皮亦软化, 果实承载能力不断下降。

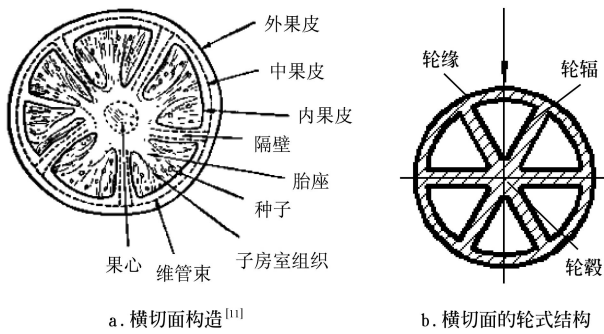


图 4 番茄果实的横切面及其简化轮式力学结构

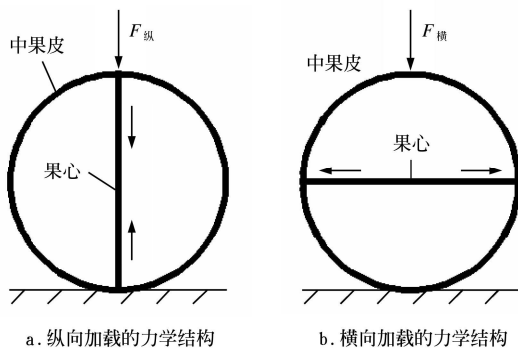
Fig.4 Cross section of tomato fruit and its simplified wheel-type force structure

1.3.2 番茄果实抗挤压能力的各向异性

纵向和横向挤压时, 裂纹均出现在纵向截面内, 故将果实纵向截面进一步简化为图 5a、b 所示环形结构, 或两个弓字梁的对称结构, 果实可视为由若干环形结构所 Δg 组成 (图 5c)。当果实纵向加载时, 其抗挤压能力 $F_{\text{横}}$ 为所有纵向环形结构 Δg 抗挤压能力的叠加, 可推得

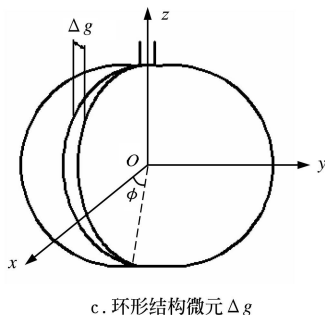
$$\begin{aligned} F_{\text{横}} &= \sum_{i=1}^n F(\Delta g_i) \\ &= \int_0^{\pi} F_0 d\phi \\ &= \pi F_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ϕ ——环形结构 Δg 在横向平面 xOy 内的投影与 x 轴的夹角, $F(\Delta g) = F_0 \Delta \phi$ 为环形结构微元 Δg 的抗挤压能力。



a. 纵向加载的力学结构

b. 横向加载的力学结构



c. 环形结构微元 Δg

图 5 番茄果实的简化环形力学结构

Fig.5 Simplified ring-type force structure of tomato fruit

当横向加载时, 其承载能力 $F_{\text{纵}}$ 仅为若干纵向环形结构 Δg 承载能力沿横向加载方向分量的叠加, 可推得

$$\begin{aligned} F_{\text{纵}} &= \sum_{i=1}^n F(\Delta g_i) \sin \phi_i \\ &= \int_0^{\pi} F_0 \sin \phi d\phi \\ &= 2F_0 \end{aligned} \quad (2)$$

另一方面, 果实整体受纵向和横向挤压时, 其果心分别受到压缩和拉伸作用力, 作为黏弹性体, 果心的压缩强度比拉伸强度要大得多。综合以上两种因素, 番茄的纵向抗挤压能力明显大于横向。

2 果梗折断与拉断试验

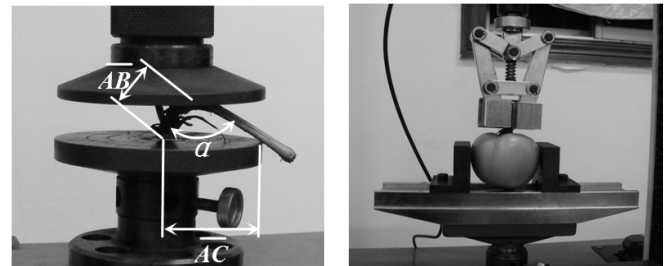
2.1 材料与方法

2.1.1 试验材料与试验设备

选取带梗青果期、绿熟期、初熟期、半熟期番茄各 20 个, 不同成熟度番茄随机取 10 个, 自花萼处折下果梗 (柄), 进行果梗折断试验; 剩余番茄带梗进行拉断试验。试验在 WDW30005 型微控电子万能试验机上进行。

2.1.2 试验方法

果梗折断试验中, 利用该万能试验机采用图 6a 所示方式加载, 由游标卡尺和量角器测定果柄长度 \overline{AB} 、花萼端至下压盘外缘的径向距离 \overline{AC} 和离层弯角 α , 在离层处施加向下的作用力直至折断, 由微机自动记录该作用力。随后在该万能试验机上, 通过更换拉伸夹具, 进行果梗拉断力试验 (图 6b)。



a. 折断试验

b. 拉断试验

图 6 番茄果梗折断与拉断试验加载图

Fig.6 Loading tests images of bending and stretching for tomato peduncles

2.2 理论分析

该方式可简化为图 7 折角简支梁结构, A 为果柄花萼端, 与基座由固定铰链联接, C 端由铰链滑块支承, 在 B 点离层处受力 F_M 作用而折断。通过测定的果柄长度 \overline{AB} 、支座距离 \overline{AC} 和弯角 α , 果梗自离层处折断所需弯矩可由下式得到

$$\begin{aligned} M &= F_M \cdot \overline{AD} \\ &= F_M \cdot \overline{AB} \cdot \cos \angle BAC \end{aligned} \quad (3)$$

在三角形 $\triangle ABC$ 中, 分别根据余弦定理和正弦定理, 有

$$\overline{AB}^2 + \overline{BC}^2 - 2\overline{AB} \cdot \overline{BC} \cdot \cos \alpha = \overline{AC}^2 \quad (4)$$

$$\frac{\overline{AC}}{\sin \alpha} = \frac{\overline{BC}}{\sin \angle BAC} \quad (5)$$

(4)、(5) 两式联立，可求得 $\angle BAC$ ，并进而由式 (3) 得到果梗折断弯矩 M 。

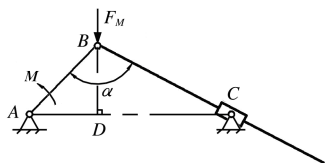


图 7 番茄果梗折断试验简化受力图

Fig.7 Simplified force diagram of bending test for tomato peduncles

2.3 试验结果分析

2.3.1 折断弯矩

4 组果梗离层处的平均弯角 α 为 130.26° ，均从离层处折断，平均折断弯矩为 $161.29 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，最大折断弯距为 $308.72 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，平均离层折断位移仅为 2.61 mm ，表明通过折断果梗进行果实采摘是一种方便易行的方式。不同成熟度果梗的折断弯矩具有以下规律（图 8）：

绿熟期 > 初熟期 > 半熟期 > 青果期

青果期、初熟期与半熟期的结果较为接近，表明不同成熟期采摘时，机器人与果实间的作用力、运动参数相近，这为采摘机器人的设计与控制提供了极大方便。

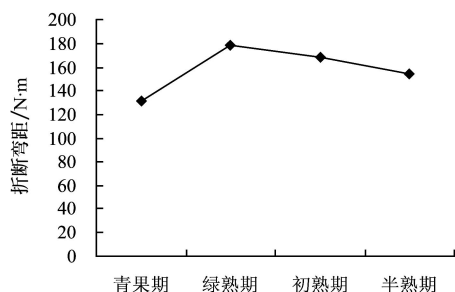


图 8 不同成熟期番茄的果梗折断弯距

Fig.8 Bending moment for tomato peduncle of different ripening phases

2.3.2 拉断力

被测果梗均从离层处断裂，平均拉断力为 22.53 N ，最大拉断力达到了 34.29 N ，不同成熟度下果梗的拉断力较为接近（表 2）。采摘机器人作业时，在通常采用的摩擦夹持情况下，需依靠外果皮与夹持指面间的摩擦力来拉断果梗，故有

$$F_p = kfF_R \quad (6)$$

式中 F_p ——拉断力； k ——手指个数（一般 $k=2\sim 4$ ）； f ——外果皮与夹持指面间的摩擦系数或当量摩擦系数； F_R ——果实所受挤压力。

由于番茄外果皮非常光滑，在雨后、露水或湿度较大情况下外果皮与夹持指面材料间的摩擦系数将更小，因此拉断果梗意味着果实将需要更大挤压力的作用，容易造成果实的破坏。同时，机器人的机械手和抓持机构

负荷过大，造成机器人驱动功率及尺寸增大。相对于折断方式拉断果梗并非理想的机器人采摘方式。

表 2 不同成熟期番茄的果梗拉断力

Table 2 Tensile force for tomato peduncles of different ripening phases

时 期	最大值/N	平均值/N	最小值/N
青果期	11.84	21.89	31.05
绿熟期	12.97	23.40	29.82
初熟期	15.18	22.99	30.07
半熟期	13.63	23.77	34.29

3 结论与讨论

1) 番茄果实受挤压时，具有明显的各向异性，同时不同成熟度下挤压破裂力以绿熟期最大，青果期次之，初熟期再次之，半熟期最小。

2) 番茄果实的挤压特性与果皮强度及果实的内部构造有关，可通过简化轮式结构及环形结构解释其各项异性及不同成熟度下的差异。

3) 番茄果梗的折断弯矩很小，且绿熟期、初熟期与半熟期相近，非常适合于作为机器人的采摘方式。果梗的折断弯矩与离层处弯角、果柄长度有关，其与离层直径的关系有待进一步确定。

4) 番茄果梗的拉断力较大，不适用于作为机器人的采摘方式。果梗拉断力与成熟度、离层直径的关系亦有待进一步确定。

[参 考 文 献]

- [1] Idah P A, Ajisegiri E S A, Yisa M G. An assessment of impact damage to fresh tomato fruits[J]. AU J T, 2007, 10(4): 271—275.
- [2] Van Linden V. Identification of fruit parameters responsible for impact-bruising of tomatoes[D]. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [3] Goyal R K, Kingsly A R P, Pradeep Kumar, et al. Physical and mechanical properties of aonla fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4): 595—599.
- [4] Singh Krishna K, Sreenivasula Reddy B. Post-harvest physico-mechanical properties of orange peel and fruit[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(2): 112—120.
- [5] 王 荣, 焦群英, 魏德强. 葡萄与番茄宏观力学特性参数的确定[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 54—57.
- [6] 王 荣, 焦群英, 魏德强, 等. 葡萄的力学特性及有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 7—10.
- [7] 王 荣, 焦群英, 高永毅. 番茄力学特性的研究[J]. 农机化研究, 2003, 4: 56—59.
- [8] 李 成, 马小愚, 雷 溥. 番茄果实力学特性及与成熟度关系的试验研究[J]. 农机化研究, 2006, 1: 167—169.
- [9] 周会玲, 李嘉瑞. 葡萄浆果耐压力、耐拉力与果实结构的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 106—109, 114.
- [10] 李小昱, 王 为. 苹果压缩特性的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(2): 107—110.
- [11] 齐藤隆, 片冈节男. 番茄生理基础[M]. 上海科学技术出版社, 1981.

Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting

Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo, Mao Hanping

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Mechanical properties of tomato fruits and its peduncles are vital basis in design and control of tomato harvesting robot. Tests of compression from transversal and longitudinal directions for tomato fruit of different ripening phases, and tests of bending and stretching for tomato peduncle were conducted. Test results show the tomato fruits' capacity of resistance for compression is significant anisotropy and it reaches the peak from greenness stage to green ripening stage, and then falls rapidly with increase of maturity. These results are explained with simplified force structure. Test results of stretching and bending for tomato peduncles indicate that all peduncles break at absciss layer and peduncle bending is a better way to detach fruit for robotic tomato- harvesting.

Key words: harvesting robots, mechanical properties, tomato, maturity

更 正 启 事

发表在《农业工程学报》2008年第9期第一作者署名刘玉环的文章为中美合作的研究成果，因为该文通信作者Roger Ruan的疏忽，遗漏了美方重要作者Hanwu Lei, Yiqin Wan，应通信作者要求，现更正如下。

原文章作者为：

Starch based polyester type water resistant wood adhesive

Liu Yuhuan^{1,2}, Roger Ruan^{1,2,3*}, Liu Chengmei^{1,2}, Lin Xiangyang²,
Xie Mingyong^{1,2}, Peng Hong^{1,2}, Zheng Dandan²

(1. The State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. The Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

3. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul, 55108 USA)

现更正为：

Starch based polyester type water resistant wood adhesive

Liu Yuhuan^{1,2}, Yiqin Wan^{1,2,3}, Hanwu Lei⁴, Roger Ruan^{1,2,3*}, Liu Chengmei^{1,2},
Lin Xiangyang², Xie Mingyong^{1,2}, Peng Hong^{1,2}, Zheng Dandan²

(1. The State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. The Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

3. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul, 55108 USA;

4. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, South Dakota State University, Brookings, SD 57007)