

# 甘薯块根质构特性的研究进展

张思梦, 陆国权\*, 林燕, 吕尊富, 崔鹏

(浙江农林大学农业与食品科学学院/浙江省农产品品质改良重点实验室, 杭州 311300)

**摘要:** 甘薯是重要的粮食、饲料及食品工业原料作物, 质构特性是甘薯品质的重要组成部分, 是评估其质量优劣的重要指标, 它直接影响块根食用品质以及产后加工途径、技术及其利用价值。质构特性是近年来甘薯研究的一个热点。本文对甘薯块根质构测定及评价方法、影响质构特性变化的各种因素作用等多个方面研究结果进行较为系统的综述, 对甘薯质构研究中存在的问题以及今后的发展方向和前景进行了讨论和分析, 这对于进一步深入研究甘薯以及其他根茎作物物质构特性, 以及质构特性育种改良、产品品质提高具有重要理论和实践指导意义。

**关键词:** 甘薯; 质构特性; 质地多面分析法; 加工方式; 品质

## Research progress on the texture characteristics of sweetpotato storage roots

ZHANG Si-Meng, LU Guo-Quan\*, LIN Yan, LV Zun-Fu, CUI Peng

(College of Agriculture and Food Science, Zhejiang A&F University/The Key Laboratory for Quality Improvement of Agricultural Products of Zhejiang Province, Hangzhou 311300, China)

**ABSTRACT:** Sweetpotato is an important raw material crop for food, feed, and food industry. As an important part of the quality of sweetpotato, the texture characteristic is an important indicator for evaluating its quality. It directly affects the edible quality of roots, post-production methods, technologies and their utilization value. In recent years, texture properties have been a hot spot in sweetpotato research. This paper systematically summarized the the determination and evaluation methods of texture structure of tuberous root, and the effects of various factors affecting texture characteristics of sweetpotato, discussed and analyzed the problems in the research on the texture of sweetpotato and the future development direction and prospects, which had important theoretical and practical guiding significance for further in-depth study of the texture characteristics of sweetpotato and other rhizomes, as well as the improvement of texture characteristics and the improvement of product quality.

**KEY WORDS:** sweetpotato; texture characteristics; texture profile analysis; processing method; quality

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(31671750)、国家甘薯产业技术体系专项资金项目(CARS-10-B20)、浙江省农业(粮食)新品种选育重大科技专项子专题项目(2016C02050-7-5)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China General Project (31671750), National Sweet Potato Industrial Technology System Special Fund Project (CARS-10-B20), and Zhejiang Agricultural (Food) New Variety Selection and Breeding Major Science and Technology Special Sub-thematic Project (2016C02050-7-5)

\***通信作者:** 陆国权, 博士, 教授, 主要研究方向为薯类品质评价及其产后商品化利用研究。E-mail: lugq10@zju.edu.cn

\***Corresponding author:** LU Guo-Quan, Ph.D, Professor, College of Agriculture and Food Science, Zhejiang A&F University, No.666 Wusu Street, Lin'an District, Hangzhou City, Zhejiang Province. E-mail: lugq10@zju.edu.cn

## 0 引言

甘薯是重要的粮食、饲料、工业原料和新能源作物<sup>[1]</sup>。甘薯块根富含淀粉,是继小麦、水稻、玉米、马铃薯、大麦和木薯之后世界排名第 7 的粮食作物<sup>[2]</sup>,种植地遍布全世界 100 多个国家,年总产量约 1 亿吨<sup>[3]</sup>,常年种植面积稳定在 400 万公顷。甘薯储藏根富含胡萝卜素、膳食纤维、维生素和淀粉,可作为蔬菜、饲料和工业原料,还兼具保健、药用作用<sup>[4-6]</sup>。品质是消费者评价食物可接受性的首要因素,质构特性作为甘薯品质的关键因素,不仅影响整个感官品质<sup>[7-8]</sup>,还直接影响甘薯块根食用品质及产后加工价值等,同时也是其采收和品质评价的重要指标<sup>[9-10]</sup>。甘薯质构特性是评估其质量优劣的重要指标之一<sup>[11]</sup>,是由自身内在因子来决定,在甘薯产前到产后加工过程中由于各种因素导致甘薯质构特性的改变,因此,研究全产业链中甘薯薯块质构具有十分重要的意义。本文对甘薯块根质构测定及评价方法、影响质构特性变化的各种因素作用等多个方面研究结果进行较为系统的综述,对甘薯质构研究中存在的问题以及今后的发展方向和前景进行讨论和分析,为进一步深入研究甘薯以及其他根茎作物物质构特性,以及质构特性育种改良、产品品质提高提供参考依据。

## 1 甘薯块根质构特性测定及评价方法的构建

质构在食品物性学中被广泛用来表示食品的组织状态、口感,质构特性是由食品成分、组织结构决定的物理性质,主要是由食品与口腔等人体部位的接触感觉的,与风味、气味等化学反应无关<sup>[12]</sup>。过去质地多为感官评价,存在个人偏好,实验结果不能保证精确性,目前国内外常用感官评价与机械物理测定 2 种方法,与感官评价相比,仪器分析有高的灵敏性和客观性,TRUONG 等<sup>[13]</sup>研究了甘薯质构特性与感官评价的关系,结果表明,质构参数与口感和感官特性显著相关,能够很好地预测甘薯的适口性。常用的机械物理测定主要使用单轴压缩实验、质地多面分析法(texture profile analysis, TPA 法)、剪切实验、穿刺实验等来评价质构特性<sup>[14-15]</sup>。仪器测定质构在国内应用较多的是质构仪质地多面分析,是唯一全面测定质构品质的方法<sup>[16]</sup>,已经被应用于水果、蔬菜、薯类作物以及面包、馒头、糕点、乳酪等加工食品中。TPA 是近年来发展起来的一种新型测试方法,主要通过对试样进行 2 次压缩的机械过程来模拟人口腔的咀嚼运动,利用力学测试方法来模拟食品质地的感官评价<sup>[17]</sup>。该方法克服了传统检测法的一些缺点,且评价参数的设定也更为客观,因此,它是判断果蔬质地变化的有效方法<sup>[18]</sup>,也称全质构分析法,主要是通过探头的 2 次下压全面地反映待测物的硬度、黏附性、弹性、胶黏性和咀嚼性等。硬度是第一次挤压循环的最大力量峰值,

表示薯块越过生物屈服点后,外界继续施加一定程度的压力,薯块所受力大小,反映了薯块对变形抵抗的性质。黏附性是第一次挤压的负峰面积,是探头脱离薯块表面所做的功。内聚性是指甘薯块根在破裂之前可以变形的水平,是内部凝聚强度的量度,反映了块根内部结合力的大小和保持完整性的能力。弹性是指甘薯块根在第一次挤压结束后,第二次挤压开始前样品恢复的高度。胶黏性是指甘薯块根被吞咽前破碎它所需要的力。咀嚼性反映了薯块对咀嚼的持续抵抗性,是硬度、弹性和内聚性三者的乘积,综合反映了其对咀嚼的持续抵抗性<sup>[19]</sup>。

甘薯质构特性的研究起步相对较晚,陈丽<sup>[20]</sup>对甘薯质构特性检测方法研究,结果表明甘薯块根部位和探头检测方向对质构指标影响显著,取中部薯肉进行检测最有代表性;确定了 3 种质构检测探头的检测参数:(1)穿刺实验的最佳测试条件为:采用 P/5 圆柱型探头,穿刺前速率 1 mm/s,穿刺速率 1 mm/s,穿刺距离 5 mm/s,穿刺后速率 1.5 mm/s。测试开始模式为:Auto(Force),启动力:0.1 N。(2)剪切实验的最佳测试条件为:选用 1/2 单刀剪切探头,剪切前速率 1 mm/s,剪切速率 1 mm/s,剪切后速率 1.5 mm/s。测试开始模式为:Auto(Force),启动力:0.1 N。(3)TPA 最佳测试条件为:选用 P/75 探头,测试前速率 1 mm/s,测试速率 1 mm/s,测试后速率 1.5 mm/s。2 次压缩间隔时间分别取 5 s,压缩比取 30%,测试开始模式为:Auto(Force),启动力:0.1 N。潘超等<sup>[21]</sup>建立了质构预测薯块质量的回归方程。李玲等<sup>[19]</sup>认为 PCA-Entropy TOPSIS 法能够较好的评价质构品质,可作为甘薯质构特性体系构建的重要手段。王晓彬等<sup>[22]</sup>对甘薯淀粉凝胶质构的测定研究表明,测试距离和速度对硬度和胶凝性测定有显著的影响;停留时间对凝胶胶凝性测定有显著影响;测试速度和测后速度对凝胶内聚性测定有显著影响;测定条件对凝胶脆性的测定无显著影响。

## 2 甘薯质构特性的影响因素

### 2.1 影响甘薯质构特性的内在因子

甘薯的质地特性主要表现为硬度、黏性、脆裂性等一些物理特征,甘薯质地特性与其营养成分之间存在密切的联系,找出质构和营养品质之间的关系,可用于快速检测大样本量的指标,能够有效满足生产实践的实际需求<sup>[22-23]</sup>。甘薯块根的干率与硬度存在极显著正相关,唐道彬等<sup>[24]</sup>以 129 份甘薯品种(系)建立了拟合度较好的甘薯干物质含量与硬度预测模型,以径向切割心部与径向切割中部硬度的平均值建立甘薯干物质含量与硬度间的回归方程为  $Y=0.674X+3.618$  ( $20 \leq X \leq 60$ ,  $r^2=0.712$ );用该回归方程验证 20 个样品集,计算所得干物质含量值与测定值相对误差为 0.2%。ANDO 等<sup>[25]</sup>研究发现甘薯的淀粉含量与质

构评价结果具有极显著的相关性,  $r=0.958^{**}$ 。因此, 根据干物质和淀粉含量对质构进行预测。

薛冠炜<sup>[23]</sup>认为烤薯黏附性与还原糖呈极显著正相关。相关研究认为, 细胞组织学特征对果蔬机械特性和质构感知有影响<sup>[26]</sup>。此外, 与质构相关的感官属性, 如硬度、弹性、粘性、颗粒感等也取决于内部组织结构。根据细胞的形状、大小、空间排列、类型和细胞间隙, 薄壁组织可能表现出不同的质构特性<sup>[27]</sup>。薄壁细胞的形状和大小等指标对质构特性(如强度和弹性等)的影响在马铃薯<sup>[28]</sup>、苹果<sup>[29]</sup>的研究中得以证实, 因此薄壁组织细胞的大小和性状是影响其质构特性的重要因素。ACHINTA 等<sup>[30]</sup>通过透射电镜对细胞壁结构进行研究分析发现煮制的马铃薯在软化过程中, 其细胞壁部分降解, 厚度减少, 微纤丝松, 细胞壁结构的变化影响了质构特性。果胶的含量和形式在调节细胞间黏附和细胞壁结构温度方面起着重要作用, 在梨<sup>[31-32]</sup>、鳄梨<sup>[33]</sup>、嘎啦苹果<sup>[34]</sup>等研究中均表明果胶含量的变化会导致质构改变; 木质素主要的基本结构单位是苯丙烷, 苯丙烷残基以多种连接方式形成多聚体, 是一类细胞壁机械强度密切相关的特殊化合物, 在芹菜<sup>[35]</sup>的质构研究中表明木质素含量与质构特性变化密切相关。刘超超等<sup>[36]</sup>研究认为纤维素酶是调控苹果硬度变化的关键酶; 王玮等<sup>[37]</sup>研究结果表明半纤维素酶活性纤维素酶共同作用导致了甘薯质构品质的变化; 而  $\beta$ -半乳糖苷酶是作用于  $\beta$ -半乳糖支链非还原末端的水解酶, 同果胶酶一样在细胞壁结构溶解或降解中起着重要作用, 通过降解  $\beta$ -半乳糖残基的成分而引起果胶、半纤维等溶解, 使细胞间连接减少、细胞壁的组分变得不稳定而参与质构品质形成过程。在桃、苹果的质构特性研究中, 表明编码  $\beta$ -半乳糖苷酶的相关基因是导致它们质构差异的关键基因之一<sup>[38-40]</sup>。这给甘薯质构的内在影响因子研究提供了方向和参考。

## 2.2 品种、收获时间、贮藏对甘薯质构特性的影响

甘薯从收获到加工前, 都是具有生命的个体, 甘薯块根自身在不断的变化, 必然引起质构特性的变化。从扦插到收获的生长过程中, 甘薯块根营养物质逐渐积累<sup>[41]</sup>, 其质构特性不仅受到品种的遗传控制, 还与生长期内的环境效应有关, 两者相互作用<sup>[42-43]</sup>。甘薯产前质构特性相关研究表明品种间内聚性差异较小, 硬度、咀嚼性、胶黏性和黏附性差异较大, 不同收获期对甘薯质地有显著影响<sup>[23]</sup>, 并认为心香、浙薯 75 和农林 54 在生长期为 100~120 d 时, 适合淀粉加工, 鲜薯硬度大于 145 N; 在生长期 100、120、140 d 时, 适合烤薯加工; 心香在生长期 140 d 时, 适合进行薯片加工, 浙薯 75 和农林 54 不适合进行薯片加工。甘薯贮藏期质构研究表明: 薯块的硬度和黏附性、咀嚼性在贮藏期呈下降趋势, 且在储藏的后期薯块质构特性变化较快, 薯块的黏附性和咀嚼性随着薯块的增大而增加<sup>[44]</sup>。甘

薯在 4 °C 和 10 °C 贮藏温度下质构的变化研究表明贮藏温度对弹性与粘结性无显著影响, 对硬度有显著性影响, 4 °C 贮藏能较好的保持甘薯的咀嚼性<sup>[45]</sup>。

## 2.3 不同加工方式对甘薯质构特性的影响

甘薯加工食品因深受大众喜爱, 其加工方式种类多样, 不同类型的甘薯加工食品有着相对应的要求, 且加工方式的差异会导致质构特性的差异。常见的甘薯加工食品有鲜食熟化、薯干、面条等。杨焯等<sup>[46]</sup>针对不同熟化方式(微波、煮、蒸、烤)对甘薯质构的影响研究结果表明: 微波熟化的甘薯硬度最高, 煮熟熟化的硬度低于高压蒸熟和烘烤熟化; 烘烤熟化、高压蒸熟和微波熟化的薯块弹性较高。王君<sup>[47]</sup>对传统薯干干燥过程的质构研究表明: 薯干的硬度、内聚性、胶黏性和咀嚼性随着干燥时间的延长而增大。樊镇棣<sup>[48]</sup>利用质构对传统普通薯干生产工艺、客家倒蒸生产工艺、改良三倒蒸生产工艺产品进行研究, 更加科学的分析不同工艺的优劣, 结果表明采用改良三倒蒸工艺加工的薯干具有较低的硬度和较好的弹性、胶黏性、黏附性和咀嚼性, 感官评价结果较好。范会平等<sup>[49]</sup>发现甘薯质构和生湿面条的品质有着密切的联系, 其中甘薯的硬度与脆度、胶黏性、弹性、内聚性、咀嚼性和回复性和感官评分呈极显著的负相关, 且质构参数与生湿面的断条率、最佳蒸煮时间、蒸煮损失率存在显著性相关。除此之外, 质构在粉丝<sup>[50-51]</sup>、饼干<sup>[52]</sup>、薯泥<sup>[53]</sup>、馒头<sup>[54]</sup>及膨化食品<sup>[55]</sup>等甘薯食品加工工艺方面的具有重要作用。

## 3 甘薯质构特性研究存在的问题及发展前景

近年来, 甘薯质构特性的研究逐渐丰富, 质构仪在甘薯品质鉴定和加工产品的应用也愈加广泛, 质构特性在甘薯研究中至关重要, 但甘薯质构的研究时间较短, 存在以下不足。

(1) 甘薯质构测定参数名称还未统一, 测定条件缺少统一公认的评价标准, 现在各学者取样方式、参数设定还未统一, 不具备横向比较的可能性。潘超、陈丽等<sup>[20-21]</sup>进行了鲜薯质构不同测试条件的比较, 确定最适的测定方式, 但未进行大范围的应用。建立科学公认的甘薯质地测试条件的标准对甘薯质构研究十分重要, 因此, 确定甘薯质构特性的统一评价方法是急需解决的问题之一。

(2) 许多研究证明甘薯块根质构和营养品质间存在紧密关联, 明确其具体关联有着较大的实际应用价值。在这方面的研究应用结果目前只达到了建立干物质含量和硬度的预测模型, 但其他营养指标间还未有应用研究成果, 甘薯块根每年的品质鉴定, 不仅需要大量的时间, 也耗费大量的人力物力, 建立甘薯质构和营养品质的预测模型, 将为甘薯研究提供有效便利的手段。例如 YOON 等<sup>[56]</sup>研究表明甘薯块根质构品质特性与淀粉含量显著相关且质构参数

可预测甘薯品种特性。

(3)质构能够更科学地评价感官口感,甘薯不同加工方式对质构影响研究较多,而通过质构来判断适宜的加工方式研究较少,薛冠炜<sup>[23]</sup>通过烤薯质构特性对甘薯适合的加工方式进行了分类,但甘薯质构的应用价值远不止于此,收集不同加工方式中表现较好的甘薯品种并对其进行统计分析,明确各种加工方式所需要的鲜薯质构特性类型,建立鲜薯质构特性和适宜加工方式的判定模型,对于甘薯的加工起到理论指导作用并可以促进甘薯加工产业发展。

(4)质构特性是由多因素影响的,找到影响甘薯质构特性的因子并对其调控,对甘薯品质的调控起着重要作用。目前内在因子和甘薯质构的相关研究表明了营养指标对于甘薯质构特性有一定的联系,但并未进行更深层次的挖掘。对甘薯质构各个参数逐一研究,能更加有效、准确的找到影响因子。

#### 参考文献

- [1] HUANG JK, SONG J, QIAO FB, *et al.* Sweetpotato in China: Economic aspects and utilization in pig production [R]. Bogor, Indonesia: International Potato Center, East, Southeast Asia and the Pacific Region (CIP-ESEAP), 2003.
- [2] DAMIAN L, DEBORA K, IBOK O, *et al.* Evaluation of 10 genotypes of sweetpotato for fries [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(2): 589–598.
- [3] 吴银亮, 王红霞, 杨俊, 等. 甘薯储藏根形成及其调控机制研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2017, 53(5): 749–757.  
WU YL, WANG HX, YANG J, *et al.* Advances in storage root development and regulation in sweetpotato [J]. *Acta Phytophysiol*, 2017, 53(5): 749–757.
- [4] 张立明, 王庆美, 王荫焜. 甘薯的主要营养成分和保健作用 [J]. *杂粮作物*, 2003, (3): 162–166.  
ZHANG LM, WANG QM, WANG YC. The main nutrient components and health care function of sweet potato [J]. *Rain Fed Crops*, 2003, (3): 162–166.
- [5] VAN JPI, FABER M, TANUMIHARDJO SA, *et al.* Beta-carotene-rich orange-fleshed sweet potato improves the vitamin A status of primary school children assessed with the modified-relative-dose-response test [J]. *Am J Clin Nutr*, 2005, 81(5): 1080–1087.
- [6] MOHANRAJ R, SIVASANKAR S. Sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam)-a valuable medicinal food: A review [J]. *J Med Food*, 2014, 17(7): 733–741.
- [7] SEYMOUR GB, MANNING K, ERIKSSON EM, *et al.* Genetic identification and genomic organization of factors affecting fruit texture [J]. *J Exp Bot*, 2002, 53(377): 2065–2071.
- [8] CAUSSE M, BURET M, ROBINI K, *et al.* Inheritance of nutritional and sensory quality traits in fresh market tomato and relation to consumer preferences [J]. *J Food Sci*, 2003, 68(7): 2342–2350.
- [9] WEI JM, MA FW, SHI SG, *et al.* Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2009, 56(2): 147–154.
- [10] 刘丙花, 王开芳, 王小芳, 等. 基于主成分分析的蓝莓果实质地品质评价 [J]. *核农学报*, 2019, 33(5): 927–935.
- [11] LIU BH, WANG KF, WANG XF, *et al.* Evaluation of fruit texture quality of blueberry based on principal component analysis [J]. *Chin J Nucl Agric*, 2019, 33(5): 927–935.
- [12] 马代夫, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业及产业技术的发展和展望 [J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(5): 969–973.  
MA DF, LI Q, CAO QH, *et al.* Development and prospect of sweetpotato industry and its technologies in China [J]. *Jiangsu J Agric*, 2012, 28(5): 969–973.
- [13] ANNA MK, KJERSTI A, HANNE S, *et al.* Instrumental and sensory analysis of fresh Norwegian and imported apples [J]. *Food Qual Prefer*, 1999, 10(4): 305–314.
- [14] TRUONG VD, HAMANN DD, WALTER JRWM. Relationship between instrumental and sensory parameters of cooked sweetpotato texture 1 [J]. *J Texture Stud*, 1997, 28(2): 98–106.
- [15] NANDWANI D. Texture profile analysis (TPA) of organic sweetpotato (*ipomoea batatas*) cultivars as affected by different processing methods [J]. *J Microbiol*, 2019, 8(6): 1254–1259.
- [16] AI S, VAN DT, SUZANNE DJ, *et al.* Chemical constituents of sweetpotato genotypes in relation to textural characteristics of processed French fries [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(1): 60–73.
- [17] 贾艳茹, 魏建梅, 高海生. 质构仪在果实品质测定方面的研究与应用 [J]. *食品科学*, 2011, 32(S1): 184–186.  
JIA YR, WEI JM, GAO HS. Study and application of texture analyzer in the assessment for fruits and vegetables texture [J]. *Food Sci*, 2011, 32(S1): 184–186.
- [18] 刘亚平, 李红波. 物性分析仪及 TPA 在果蔬质构测试中的应用综述 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 30(2): 188–192.  
LIU YP, LI HB. Review on the application of texture analyzer and TPA in the assessment for fruits and vegetables texture [J]. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2010, 30(2): 188–192.
- [19] 姜松, 王海鸥. TPA 质构分析及测试条件对苹果 TPA 质构分析的影响 [J]. *食品科学*, 2004, (12): 68–71.  
JIANG S, WANG HO. TPA and effect of experimental conditions on TPA test of apple slices [J]. *Food Sci*, 2004, (12): 68–71.
- [20] 李玲, 徐舒, 曹如霞, 等. 基于 PCA-Entropy TOPSIS 的甘薯品种块根质构品质评价 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(11): 2161–2170.  
LI L, XU S, CAO RX, *et al.* Evaluation of texture quality of sweetpotato storage roots based on PCA-Entropy TOPSIS [J]. *Sci Agric Sin*, 2020, 53(11): 2161–2170.
- [21] 陈丽. 甘薯块根质构特性的评价研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.  
CHEN L. Evaluation of the texture characteristics of sweetpotato roots [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2013.
- [22] 潘超, 陈春晓, 叶夏芳, 等. 甘薯块根质构特性的检测方法优化 [J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(2): 94–99.  
PAN C, CHEN CX, YE XF, *et al.* Optimization of detection method of the texture properties of sweet potato root tuber [J]. *Preserv Process*, 2018, 18(2): 94–99.
- [23] 王晓彬, 郭兴凤, 郝利平, 等. 测定条件对甘薯淀粉凝胶质构特性测定结果的影响 [J]. *山西农业科学*, 2013, 41(12): 1323–1326.  
WANG XB, GUO XF, HAO LP, *et al.* Influencet of testing condition on the starch gel texture properties of sweet potato [J]. *Shanxi Agric Sci*, 2013, 41(12): 1323–1326.
- [24] 薛冠炜. 品种、生长期和贮藏温度对甘薯质地品质的影响 [D]. 杭州:

- 浙江农林大学, 2018.
- XUE GW. Effects of variety, growth period and storage temperature on texture and quality of sweetpotato [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2018.
- [24] 唐道彬, 安建刚, 丁祎, 等. 甘薯块根硬度与干物质含量的相关性[J]. 作物学报, 2017, 43(8): 1234–1244.
- TANG DB, AN JG, DING Y, *et al.* Correlation between hardness and dry-matter content of storage root in sweetpotato [J]. *Acta Agron Sin*, 2017, 43(8): 1234–1244.
- [25] ANDO T, YASUDA M, HISAKA H. Effect of storage period on free sugar and starch contents of six sweetpotato varieties with different taste on baking, and quantification of sweetness and texture [J]. *Hortic Res*, 2018, 17(4): 449–457.
- [26] PIOTR MP, ARTUR Z, MIKIO U. Study on parameterisation of plant tissue microstructure by confocal microscopy for finite elements modelling [J]. *Comput Electron Agr*, 2011, 78(1): 98–105.
- [27] ALAMAR MC, VANSTREELS E, OEY ML, *et al.* Micromechanical behaviour of apple tissue in tensile and compression tests: Storage conditions and cultivar effect [J]. *J Food Eng*, 2007, 86(3): 324–333.
- [28] ACHINTA B, LOVEDEEP K, JASPREET S. Parenchyma cell microstructure and textural characteristics of raw and cooked potatoes [J]. *Food Chem*, 2012, 133(4): 1092–1100.
- [29] DIDIANA GL, FRANÇOIS L, MARIE FD, *et al.* Texture analysis in an apple progeny through instrumental, sensory and histological phenotyping [J]. *Euphytica*, 2012, 185(2): 171–183.
- [30] ACHINTA B, LOVEDEEP K, JASPREET S. Parenchyma cell microstructure and textural characteristics of raw and cooked potatoes [J]. *Food Chem*, 2012, 133(4): 1092–1100.
- [31] 齐秀东, 魏建梅, 高海生, 等. 梨果实发育软化与果胶多糖降解特性的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 3027–3037.
- QI XD, WEI JM, GAO HS, *et al.* Pectin polysaccharide degradation in relation to the texture softening in pear fruit [J]. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(15): 3027–3037.
- [32] 岳英, 鲁晓燕, 刘艳, 等. 梨不同品种果实硬度与果胶含量的相关性研究[J]. 北方园艺, 2011, (15): 15–17.
- YUE Y, LU XY, LIU Y, *et al.* Study on correlation between firmness and pectin content of different pear cultivars [J]. *Northern Hortic*, 2011, (15): 15–17.
- [33] DEFILIPPI BG, EJSMENTEWICZ T, COVARRUBIAS MP, *et al.* Changes in cell wall pectins and their relation to postharvest mesocarp softening of "Hass" avocados (*Persea americana* Mill.) [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2018, 128: 142–151.
- [34] 齐秀东, 魏建梅, 赵伶俐. 嘎拉苹果果实质地发育软化与细胞壁降解及其基因表达的关系[J]. 现代食品科技, 2015, (6): 91–96.
- QI XD, WEI JM, ZHAO LL. Correlation of fruit texture development and softening with cell wall degradation and related gene expression in gala apples [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, (6): 91–96.
- [35] SONIA ZV, ALICIA RC. Texture changes in fresh cut celery during refrigerated storage [J]. *J Sci Food Agric*, 2003, 83(13): 1308–1314.
- [36] 刘超超, 魏景利, 徐玉亭, 等. 苹果3个早熟品种果实发育后期硬度及其相关生理指标的初步研究[J]. 园艺学报, 2011, 38(1): 133–138.
- LIU CC, WEI JL, XU YT, *et al.* Preliminary study on firmness and related physiological indices of three early-ripening apple cultivar during late development of the fruit [J]. *Acta Hort Sin*, 2011, 38(1): 133–138.
- [37] 王炜, 李鹏霞, 胡花丽, 等. 甘薯在贮藏期间细胞壁降解酶活性的变化[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(7): 186–189.
- WANG W, LI PX, HU HL, *et al.* Study on the activity of cell wall degradation enzyme of sweet potato in its storage [J]. *Food Ferment Ind*, 2012, 38(7): 186–189.
- [38] 阙娟, 刘俊, 金昌海. 桃果实成熟软化与细胞壁降解相关糖苷酶及乙烯生物合成的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2931–2938.
- KAN J, LIU J, JIN CH. Study on the relationship between peach fruit softening, cell wall degradation related glycosidase and ethylene biosynthesis [J]. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(14): 2931–2938.
- [39] LIU HK, MING Q, CHUNHUI S, *et al.* Down-Regulation of PpBGAL10 and PpBGAL16 delays fruit softening in peach by reducing polygalacturonase and pectin methylesterase activity [J]. *Front Plant Sci*, 2018, 9: 1015–1030.
- [40] 陈学森, 宋君, 高利平, 等. ‘乔纳金’苹果及其脆肉芽变果实质地发育机理[J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 727–735.
- CHEN XS, SONG J, GAO LP, *et al.* Developing mechanism of fruits texture in 'Jonagold' apple and its crisp flesh sport [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(4): 727–735.
- [41] 황엄지, 남상식, 이준설, *et al.* Growth characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars according to growth period in early cultivation [J]. *한국작물학회지*, 2017, 62(1): 51–59.
- [42] 陆国权, 黄华宏, 何腾弟. 甘薯维生素C和胡萝卜素含量的基因型、环境及基因型与环境互作效应的分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(5): 482–486.
- LU GQ, HUANG HH, HE TD. Genotype and environmental effects on vitamin C and carotene contents in sweetpotato [J]. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(5): 482–486.
- [43] ÇALIŞKAN ME, SÖĞÜT T, BOYDAK E, *et al.* Growth, yield, and quality of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) cultivars in the southeastern anatolian and east mediterranean regions of Turkey [J]. *Turk J Agric For*, 2007, 31(4): 213–227.
- [44] 吕尊富, 潘超, 崔鹏, 等. 短期储藏对不同大小甘薯理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 30–36.
- LV ZF, PAN C, CUI P, *et al.* Effects of short-term storage on physical and chemical characteristics of sweet potato in different sizes [J]. *Chin Cere Oils Assoc*, 2019, 34(6): 30–36.
- [45] 史光辉, 胡志和, 吴子健, 等. 贮藏温度对3种甘薯品质的影响[J]. 核农学报, 2014, 29(3): 493–498.
- SHI GH, HU ZH, WU ZJ, *et al.* Effect of storage temperature on the quality of three breeds sweet potato [J]. *J Nucl Agric*, 2014, 29(3): 493–498.
- [46] 杨焯, 俞涵琛, 陆国权. 熟化方法对迷你甘薯品质和质构特性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(8): 45–50.
- YANG Y, YU HC, LU GQ. Effect of aging method on texture characteristics and quality of mini sweet potato [J]. *Food Sci Technol*, 2016, 41(8): 45–50.
- [47] 王君. 传统熟化甘薯干燥工艺、模型及品质变化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
- WANG J. Research on the drying process, model and quality change of traditional matured sweet potato [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012.

- [48] 樊镇棣. 基于质构分析的薯干加工工艺对比研究[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 108-112.  
FAN ZD. Comparative study on processing technology of dried sweet potato based on texture analysis [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(3): 108-112.
- [49] 范会平, 许梦言, 马静一, 等. 不同品种甘薯生湿面条品质特性及加工适宜性分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 111-118.  
FAN HP, XU MY, MA JY, *et al.* Analysis of the quality characteristics and processing suitability of different varieties of sweet potato raw wet noodles [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(24): 111-118.
- [50] 谭洪卓, 谭斌, 刘明, 等. 甘薯粉丝生产中添加剂对甘薯淀粉回生的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(6): 133-138.  
TAN HZ, TAN B, LIU M, *et al.* Effect of additives on retrogradation of sweet potato starch in production of its noodles [J]. Food Sci, 2008, 29(6): 133-138.
- [51] 赵晨阳, 王阳, 周芳, 等. 次粉种类对甘薯粉丝品质的影响及机制探讨[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 103-109.  
ZHAO CY, WANG Y, ZHOU F, *et al.* Effects and mechanism of binding starch on the quality of sweet potato starch noodles [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(22): 103-109.
- [52] 卢晓黎, 雷鸣, 沈成刃, 等. 远红外线烘烤制作甘薯酥脆饼干的工艺探讨[J]. 食品科学, 2002, 23(8): 202-206.  
LU XL, LEI M, SHEN CB, *et al.* Research on technology of sweet potato biscuit by far infrared ray toast [J]. Food Sci, 2002, 23(8): 202-206.
- [53] 李博, 雷激, 汤富蓉, 等. 紫甘薯泥制作工艺的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(4): 81-86.  
LI B, LEI J, TANG FR, *et al.* Study on the process of the purple sweet potato mud [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(4): 81-86.
- [54] 任妍妍, 张凤姝, 张天语, 等. 甘薯生浆对面团特性及馒头品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 158-164.  
REN YY, ZHANG FJ, ZHANG TY, *et al.* Effect of fresh sweet potato pulp on dough characteristics and quality of steamed bread [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(3): 158-164.
- [55] 王璐, 夏菠, 易有金, 等. 甘薯豆粕营养膨化食品感官指标与质构特性相关性研究[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 184-188.  
WANG L, XIA B, YI YJ, *et al.* Sweet potato meal nutrition puffed food sensory index correlation between quality and structure characteristics and research [J]. Food Ind, 2018, 39(1): 184-188.
- [56] YOON H, NO J, KIM W, *et al.* Textural character of sweetpotato root of Korean cultivars in relation to chemical constituents and their properties [J]. Food Sci Biotechnol, 2018, 27(6): 1627-1637.

(责任编辑: 韩晓红)

### 作者简介



张思梦, 硕士研究生, 主要研究方向为作物遗传资源研究与利用。  
E-mail: 1826213445@qq.com



陆国权, 博士, 教授, 主要研究方向为薯类品质评价及其产后商品化利用。  
E-mail: lugq10@zju.edu.cn