

· 园艺 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240064



主持人:朱国鹏

香蕉品种多组分主成分分析与营养价值评估

陈艳^{1,2}, 王娅玲², 李春芳^{1,2}, 王安邦^{1,3}, 李羽佳^{1,3}, 李敬阳^{1,3,4}

(1. 中国热带农业科学院 热带作物品种资源研究所,海口 571101; 2. 云南农业大学 热带作物学院,云南 普洱 611101;
3. 中国热带农业科学院 海口实验站,海口 571101; 4. 海南省香蕉健康种苗繁育工程技术研究中心,海口 571101)

摘要: 为了解香蕉 (*Musa* spp.) 在不同成熟时期的营养动态变化, 采用催熟时间序列实验, 对8个香蕉品种在成熟3个阶段的营养成分进行了分析。结果表明: 随着成熟度的提高, 不同品种间的可溶性糖含量呈现显著变化, 其中, 'Lady Finger' 品种在成熟期S3的可溶性糖含量最高, 达到22.75%, 而 'Pome' 品种在成熟期S1的淀粉含量最高, 为54.77%。淀粉含量随成熟度增加而降低, 'Pome' 品种在完全成熟时仍保持7.96%。此外, 果胶和可滴定酸的含量与可溶性糖密切相关, 而脂肪、蛋白质、可滴定酸和维生素C含量在不同品种和成熟期表现出显著差异。

关键词: 香蕉品种; 化学成分; 成熟度; 营养价值; 品质特性

中图分类号: S668.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054 (2024) 06-0709-09

陈艳, 王娅玲, 李春芳, 等. 香蕉品种多组分主成分分析与营养价值评估 [J]. 热带生物学报, 2024, 15(6): 709-717. doi:10.15886/j.cnki.rdswwb.20240064

香蕉 (*Musa* spp.) 作为一种兼具食用与粮食功能的作物, 在全球热带及亚热带地区广泛分布, 其高产、易运输的特性使其在全球水果市场占据显著位置, 尤其在发展中国家, 香蕉被联合国粮农组织 (FAO) 列为紧随水稻、小麦、玉米之后的第4大主要粮食作物^[1]。中国香蕉产业聚集于海南、广东、广西、福建、云南及台湾等地, 产量居热带水果之首^[2], 对促进热 (亚) 带区域的农村经济发展及居民生活质量提升发挥着不可小觑的作用^[3]。香蕉不仅食品价值显著, 其药用潜能, 涵盖抗溃疡、止泻、降糖、抗癌、抗抑郁及抗氧化等多方面效益^[4-5], 进一步增强了其重要性。然而, 作为呼吸跃变型水果, 香蕉在收获后处理与储藏上的挑战不容忽视, 不当处理可致高损耗率^[6]。因此, 合理开发香蕉为食品工业原料成为减少损失、增值升级的关键策略。

近年来的研究深化了对香蕉及其制品在加工

过程中变化的理解。例如, Shalini 等^[7]的工作揭示了香蕉中果聚糖成分, 为利用香蕉作为富含果聚糖的天然食品资源提供了科学依据; Campuzano 等^[8]详细分析了香蕉粉在不同成熟阶段的物理化学及营养特性变化。人们对香蕉还进行了其他方面的研究, 如香蕉果实加工方式对肾功能影响的比较^[9]、开发低热量的香蕉纤维披萨^[10]、香蕉对卢旺达社会经济价值影响^[11]、烘干方法对香蕉色泽影响^[12], 以及加工香蕉不仅可以最大限度地减少采后损失, 还可以创造出更具营养价值潜力的附加值产品^[13], 凸显了香蕉研究的广度与深度, 为香蕉产品的营养价值和应用提供了宝贵信息。尽管香蕉利用研究取得了一定进展, 但还是主要集中于少数商业化品种, 如香牙蕉和粉蕉等, 而对于具备特殊加工特性的品种关注不足, 这忽略了香蕉品种多样性的巨大潜力。发达国家如巴西和美国已实现超过60%, 甚至80%的香蕉精深加工率, 反观我国, 加工

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-07-10

基金项目: 海南省自然科学基金项目资助(321RC1087); 中央公益性科研院所基础研究基金项目(1630032022001); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-31-02);

第一作者: 陈艳(2001-), 女, 云南农业大学热带作物学院2024级硕士研究生。E-mail: 2684694705@qq.com

通信作者: 李敬阳(1976-), 男, 研究员。研究方向: 香蕉种质资源与育种。E-mail: jingyanglee@163.com

率仅约 10%，受限于品种单一（主要为香牙蕉）及加工原料短缺^[14]。因此，笔者通过系统分析引进与选育的香蕉品种在催熟过程中的化学成分与品质特征，运用时间序列实验设计与主成分分析等手段，明晰不同品种间的差异性，识别影响加工品质的关键因素，旨在指导加工型香蕉品种的筛选与定向培育，推动我国香蕉产业链的多元化与高端化发展，提升整体加工转化率与产品附加值。

1 材料与方法

1.1 材料 本研究采用了来自海南省儋州市宝岛新村中国热带农业科学院香蕉资源与新品种选育基地(19.5175°N, 109.5731°E)的 8 个不同香蕉品种(表 1)。该地年平均降水量为 1 500 ~ 2 000 mm，土壤为砖红壤。所有样品均在相同的成熟季节采集。

表 1 试验用香蕉品种

Tab. 1 Information of banana varieties

序号 No.	品种 Accession	拉丁名 Latin Name	基因型 Genotype	备注 Remark
1	'Lady finger'	<i>Musa sapientum</i> L.	AAB	ITC0336
2	'Golden finger'	<i>Musa</i> FHIA-01	AAAB	ITC0505
3	'Maixiang'	<i>Musa paradisiaca</i> L.	ABB	育成品种 bred cultivar
4	'Red'	<i>Musa acuminata</i> cv. Red Dacca	AAA	地方品种 landrace
5	'YNS'	<i>Musa sapientum</i> L.	AAB	地方品种 landrace
6	'Silk'	<i>Musa</i> Rasthali	AAB	ITC0348
7	'Kema'	<i>Musa kemaramasenge</i>	ABB	ITC0127
8	'Pome'	<i>Musa</i> subgr. Pome	AAB	ITC0076

注: ITC 代表国际资源转运中心, 后面数字代表资源编号。

Note: ITC represents the International Transit Center.

1.2 香蕉的采摘及处理 香蕉达到 7 成熟时进行采摘。香蕉的成熟阶段分为 3 个不同时期(图 1)，第 1 阶段是前期，即约 70% 成熟度时，刚采收状态(标记为 S1)。采后用 800 mg·L⁻¹ 的乙烯进行人工催熟，第 2 阶段是中期，此时果实发生软化，或果皮呈黄色并略带绿色，即后熟中期(标记为 S2)。第 3 阶段是后期，此时果皮完全变软，或果皮为黄色，或出现褐色斑点即后熟期(标记为 S3)。

为了对香蕉样品进行处理，首先将其去皮并切片，接着将切好的样品放入容器中，并使用保鲜膜封口。随后，将容器置于 -18 °C 的环境中进行冷冻处理，然后取出样品。在取出后，保留保鲜膜上的小孔，并将样品放入真空冷冻干燥机(FDU-2110)中进行冻干处理。处理完成后，将样品放入研钵中，研磨成粉状，然后通过 40 目的筛网进行筛选，最后将样品放入干燥器中保存备用，用于测定脂肪和淀粉含量。对于新鲜的香蕉果实，笔者采用液氮进行快速冷冻，然后将其存放在 -80 °C 的冰箱中以备后续使用，用于香蕉果实中的可溶性糖、果胶、蛋白质、可滴定酸和维生素 C 含量的测定。进行实验时分别选取同一品种的 3 个香蕉果实作

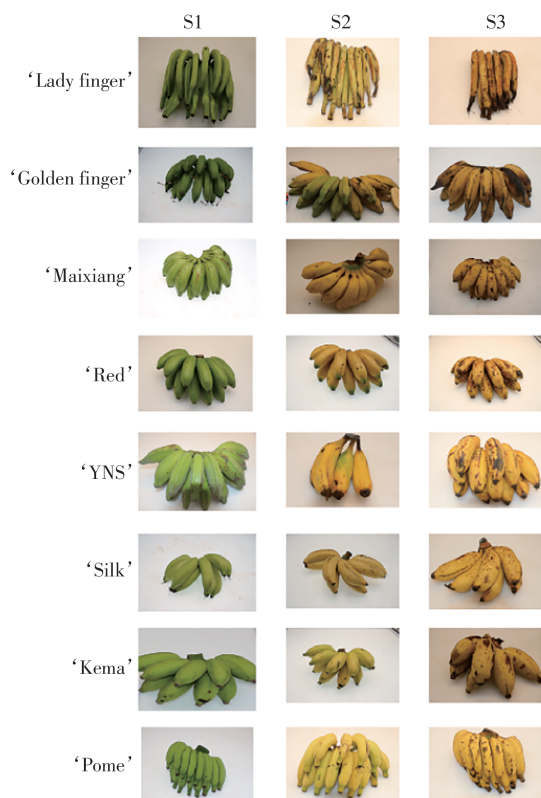


图 1 不同香蕉品种 3 个成熟阶段示意图

Fig. 1 The schematic diagram illustrates various banana cultivars at three distinct stages of ripeness

为3个生物学重复。

1.3 测定方法

1.3.1 可溶性糖含量 采用蒽酮比色法测定果实可溶性糖含量。

1.3.2 果胶含量 采用咔唑比色法^[15]来测定果胶含量。

1.3.3 脂肪含量 采用索氏抽提法测定香蕉干样品中的脂肪含量。

1.3.4 蛋白质含量 采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量,用蛋白质标准品制作标准曲线,并测定样品中的蛋白含量。

1.3.5 可滴定酸含量 采用食品安全国家标准《GB/T 5009.124—2003 食品中酸度的测定》中的方法测定香蕉样品中的可滴定酸含量。

1.3.6 维生素C含量 采用高效液相色谱法测定维生素C含量。

1.3.7 淀粉含量 采用透析法测定淀粉含量。

1.4 数据分析和统计方法 为全面评估8个香蕉品种在3个成熟阶段的化学组成异同,笔者进行了可溶性糖、果胶、可滴定酸、淀粉、脂肪、蛋白质及维生素C等多种成分的定量分析,每种样品均采取了3次独立重复测量。统计处理上,运用了SPSS(v22.0)进行ANOVA方差分析检验各品种间及其成熟阶段的化学成分是否存在显著性差异,并通过Tukey's HSD事后检验进一步确认具体差异所在;实施主成分分析(PCA),旨在降维处理复杂数据,揭示各化学成分间的潜在关联模式及品种成熟度的主要影响因素。

2 结果与分析

2.1 不同香蕉品种在成熟过程中的化学成分动态变化

2.1.1 不同成熟度阶段的香蕉可溶性糖分析 从表2可知,在S1期,‘Maixiang’的可溶性糖含量略高于‘Lady finger’、‘Pome’和‘Silk’,但其他品种的可溶性糖含量均低于1%,因此在这个成熟度阶段,各品种之间的可溶性糖含量差异不明显。随着进入S2期,可溶性糖含量显著上升。其中,‘Lady finger’的含量较高,约为14%。其余品种的可溶性糖含量由高到低的排列为‘YNS’>‘Pome’>‘Kema’>‘Golden finger’>‘Red’>‘Silk’>‘Maixiang’。在S3期,可溶性糖略微上升,其中‘Lady finger’的含量最

高(22.7%)。排列顺序为‘Lady finger’>‘YNS’>‘Kema’>‘Red’>‘Silk’>‘Maixiang’>‘Golden finger’>‘Pome’。结果表明,随着香蕉的成熟度增加,糖含量也逐渐增加。

表2 不同香蕉品种3个成熟阶段的可溶性糖含量

Tab. 2 Comparison of soluble sugars in different banana varieties and ripening stages %

品种 Accession Name	成熟阶段 Ripening stages		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	2.20 ± 0.18a	14.52 ± 1.55a	22.75 ± 0.89a
‘Golden finger’	0.71 ± 0.06a	10.20 ± 0.74cde	15.44 ± 0.58c
‘Maixiang’	3.25 ± 0.07a	7.04 ± 0.77e	16.58 ± 0.77c
‘Red’	0.86 ± 0.05a	9.93 ± 0.73cde	17.45 ± 0.54c
‘YNS’	0.22 ± 0.03a	13.58 ± 0.37ab	21.28 ± 1.09ab
‘Silk’	1.15 ± 0.11a	7.33 ± 0.38de	17.18 ± 0.71c
‘Kema’	0.58 ± 0.05a	10.58 ± 0.68bcd	17.89 ± 0.53c
‘Pome’	1.40 ± 0.07a	12.56 ± 0.92abc	15.23 ± 1.17c

注:同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$). Similarly hereinafter.

2.1.2 香蕉果实中果胶含量的时序分析与品种差异

通过测定8个香蕉品种在3个不同成熟度的果胶含量,结果发现,果胶在香蕉果实中的含量在不同生长阶段存在差异。由表3可知,在S1期生长阶段,‘Pome’的果胶含量最高,显著高于‘Lady finger’和‘Maixiang’。然而,总体而言,各品种果胶含量都相对较低,最高的‘Pome’仅为0.36%,这可能与香蕉果实未完全成熟有关。随着生长进程的推移至S2期,香蕉果实的果胶含量略有提高,但仍然较低。其中,‘Lady finger’的果胶含量最高,为0.70%,其次是‘Pome’、‘Red’、和‘Maixiang’等。这些变化可能与果实发育和成熟过程中的生化变化有关。然而,在S3期生长阶段,香蕉果实的果胶含量呈现轻微下降趋势。‘Lady finger’仍然保持最高的果胶含量,其次是‘Kema’、‘Red’、‘YNS’、‘Golden finger’、‘Maixiang’、‘Pome’和‘Silk’等。这一阶段的变化可能受到多种因素的影响,如果实成熟度、环境条件等。

2.1.3 不同阶段香蕉脂肪含量的变化 从表4可知,在S1成熟期,‘Red’品种的脂肪含量显著高于

表3 不同香蕉品种3个成熟阶段的果胶含量

Tab. 3 Comparison of Pectin content of different banana varieties and ripening stages %

品种 Accession Name	成熟阶段 Ripening stages		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	0.27 ± 0.002b	0.70 ± 0.049a	0.92 ± 0.007a
‘Golden finger’	0.08 ± 0.003e	0.41 ± 0.008e	0.41 ± 0.023cd
‘Maixiang’	0.21 ± 0.004bc	0.53 ± 0.013cd	0.36 ± 0.006de
‘Red’	0.04 ± 0.00e	0.57 ± 0.025bc	0.46 ± 0.018e
‘YNS’	0.05 ± 0.008e	0.44 ± 0.014e	0.45 ± 0.016e
‘Silk’	0.18 ± 0.009cd	0.21 ± 0.013f	0.30 ± 0.02e
‘Kema’	0.11 ± 0.007de	0.48 ± 0.016de	0.46 ± 0.008e
‘Pome’	0.36 ± 0.05a	0.62 ± 0.019b	0.30 ± 0.021e

其他品种,平均为6.33%,其次是‘Lady finger’和‘YNS’,其脂肪含量约为4%。进入S2成熟期后,‘YNS’品种的脂肪含量升至约6%,成为该阶段脂肪含量最高的品种,与此同时,‘Pome’品种的脂肪含量相对较低,为2.92%。在S3成熟期,‘Pome’和‘Kema’品种的脂肪含量都显著增加,均达到8%左右,成为高脂肪含量的品种。总体而言,不同品种的香蕉在不同成熟阶段的脂肪含量存在显著差异。在S1期,‘Red’品种展现出最高的脂肪含量;而在S2和S3期,‘Maixiang’、‘Pome’和‘Kema’品种的脂肪含量较高。结果表明,成熟阶段对香蕉脂肪含量有显著影响。

表4 不同香蕉品种及成熟阶段的脂肪含量

Tab. 4 Comparison of fat content of different banana varieties and ripening stages %

品种 Accession Name	成熟阶段 Ripening stages		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	4.36 ± 0.70b	5.46 ± 0.14ab	6.63 ± 0.17cd
‘Golden finger’	0.93 ± 0.20e	5.36 ± 0.64ab	7.19 ± 0.39abcd
‘Maixiang’	3.20 ± 0.06bc	3.20 ± 0.06bc	7.79 ± 0.35abc
‘Red’	6.33 ± 0.34a	4.50 ± 0.55bc	6.91 ± 0.08bcd
‘YNS’	4.16 ± 0.02b	5.93 ± 0.20a	6.19 ± 0.18d
‘Silk’	1.75 ± 0.68de	3.70 ± 0.27cd	6.89 ± 0.62bcd
‘Kema’	2.71 ± 0.62cd	3.44 ± 0.26cd	8.18 ± 0.35ab
‘Pome’	3.74 ± 0.72bc	2.92 ± 0.05d	8.29 ± 0.30a

2.1.4 不同香蕉品种蛋白质含量差异分析

通过测定香蕉果实蛋白质含量,结果显示(表5),在S1期,香蕉果肉中的蛋白质总体含量相对较低。其中,‘Silk’香蕉的蛋白质含量较高,为0.53%,其次是‘YNS’和‘Lady finger’,它们的蛋白质含量都约为0.2%。与其他品种相比,‘Pome’的蛋白质含量最低,仅为0.065%。在S2期,‘Silk’的蛋白质含量约为0.4%,高于其他品种,排列顺序为‘Silk’ > ‘Red’ > ‘Kema’ > ‘Golden finger’ > ‘YNS’ > ‘Lady finger’ > ‘Maixiang’ > ‘Pome’。然而,在S3期,蛋白质含量呈下降趋势,排列顺序变为‘Lady finger’ > ‘Red’ > ‘Maixiang’ > ‘Kema’ > ‘Golden finger’ > ‘Silk’ > ‘Pome’ > ‘YNS’。这些结果揭示了不同成熟期不同香蕉品种的蛋白质含量差异。具体来说,S1期的‘Silk’香蕉在蛋白质含量方面表现出色,而‘Pome’香蕉则相对较低。在S2期,‘Silk’香蕉的蛋白质含量仍然最高。而在S3期,‘Lady finger’香蕉的蛋白质含量最高。这些发现为进一步研究香蕉的营养价值和品质特性提供了重要信息。

表5 不同香蕉品种3个成熟阶段的蛋白质含量

Tab. 5 Comparison of protein content of different banana varieties and ripening stages %

品种 Accession Name	成熟阶段 Ripening stages		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	0.20 ± 0.003bc	0.26 ± 0.02cd	0.43 ± 0.004a
‘Golden finger’	0.19 ± 0.005bcd	0.30 ± 0.02cd	0.17 ± 0.04de
‘Maixiang’	0.12 ± 0.01de	0.24 ± 0.04de	0.26 ± 0.008bc
‘Red’	0.16 ± 0.02bcd	0.38 ± 0.006ab	0.31 ± 0.01b
‘YNS’	0.22 ± 0.02b	0.27 ± 0.01cd	0.13 ± 0.05e
‘Silk’	0.53 ± 0.02a	0.38 ± 0.02ab	0.17 ± 0.01de
‘Kema’	0.13 ± 0.01d	0.32 ± 0.02bc	0.23 ± 0.02cd
‘Pome’	0.06 ± 0.01e	0.19 ± 0.01e	0.15 ± 0.005e

2.1.5 香蕉果实不同成熟期可滴定酸含量的比较

可滴定酸在香蕉口感中扮演着重要角色。从表6可知,在果实S1期,‘Maixiang’和‘Lady finger’的可滴定酸含量约为1.07%,‘YNS’含量为0.714%。另一方面,‘Silk’、‘Pome’、‘Red’、‘Kema’的含量约为0.6%,而‘Golden finger’的含量较低,为0.42%。在S2期,‘Lady finger’的可滴定酸含量最高,达到了2.23%,8个品种的含量排序为

‘Lady finger’>‘Maixiang’>‘Golden finger’>‘Pome’>‘Red’>‘YNS’>‘Silk’>‘Kema’。在 S3 期,总体上可滴定酸含量呈逐步上升趋势。含量最高的仍然是‘Lady finger’,为 2.127%,排序为‘Lady finger’>‘Maixiang’>‘YNS’>‘Golden finger’>‘Silk’>‘Pome’>‘Kema’>‘Red’。本研究结果揭示了不同香蕉品种中可滴定酸含量的变化趋势。‘Lady finger’在 S2 和 S3 期的高可滴定酸含量表明其在口感和营养方面可能具有独特的特性,这可能对消费者的口味偏好和对香蕉的选购决策产生影响。

表 6 不同香蕉品种 3 个成熟阶段的可滴定酸含量

Tab. 6 Comparison of titratable acid content of different banana varieties and ripening stages %

品种 Accession Name	成熟阶段 (Ripening stages)		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	1.07 ± 0.07a	2.23 ± 0.13a	2.13 ± 0.09a
‘Golden finger’	0.42 ± 0.02d	1.32 ± 0.02c	1.54 ± 0.003bc
‘Maixiang’	1.08 ± 0.09a	1.93 ± 0.05b	1.59 ± 0.04b
‘Red’	0.65 ± 0.02c	1.12 ± 0.01cde	1.12 ± 0.01cde
‘YNS’	0.71 ± 0.05bc	1.06 ± 0.04de	1.57 ± 0.08bc
‘Silk’	0.69 ± 0.06bc	0.99 ± 0.07e	1.47 ± 0.10bcd
‘Kema’	0.62 ± 0.08cd	0.97 ± 0.04e	1.34 ± 0.05de
‘Pome’	0.66 ± 0.02c	1.23 ± 0.08cd	1.37 ± 0.03cd

2.1.6 香蕉中维生素 C 的品种差异和成熟期影响

作为品质评价的重要指标,维生素 C 的含量在不同品种和成熟期香蕉中受到了广泛关注。表 7 结果显示,在 S1 期,‘YNS’的维生素 C 含量最高,每百克果肉达到了 1.44 mg,而‘Red’每百克果肉的维生素 C 含量为 1.14 mg。与此相比,其他品种每百克果肉的维生素 C 含量都在 0.6 mg 左右,差异不显著。随着成熟期的推移,S2 期‘Red’和‘Silk’的维生素 C 含量显著增加,每百克果肉均达到了约 5 mg。这 2 个品种的维生素 C 含量均高于其他品种。排列顺序为‘Red’>‘Silk’>‘YNS’>‘Lady finger’>‘Kema’>‘Maixiang’>‘Pome’>‘Golden finger’。然而,在 S3 期,维生素 C 的含量呈逐渐下降的趋势。此时,‘Lady finger’的维生素 C 含量最高,每百克果肉为 4.98 mg。排列顺序为‘Lady finger’>‘YNS’>‘Maixiang’>‘Pome’>‘Silk’>‘Kema’>‘Red’>‘Golden finger’。

表 7 不同香蕉品种 3 个成熟阶段每百克鲜果肉的维生素 C 含量

Tab. 7 Comparison of Vitamin C content in different banana varieties and ripening stage mg

品种 Accession Name	成熟阶段 Ripening stages		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	1.07 ± 0.07a	2.23 ± 0.13a	2.13 ± 0.09a
‘Golden finger’	0.42 ± 0.02d	1.32 ± 0.02c	1.54 ± 0.003bc
‘Maixiang’	1.08 ± 0.09a	1.93 ± 0.05b	1.59 ± 0.04b
‘Red’	0.65 ± 0.02c	1.12 ± 0.01cde	1.12 ± 0.01cde
‘YNS’	0.71 ± 0.05bc	1.06 ± 0.04de	1.57 ± 0.08bc
‘Silk’	0.69 ± 0.06bc	0.99 ± 0.07e	1.47 ± 0.10bcd
‘Kema’	0.62 ± 0.08cd	0.97 ± 0.04e	1.34 ± 0.05de
‘Pome’	0.66 ± 0.02c	1.23 ± 0.08cd	1.37 ± 0.03cd

2.1.7 香蕉淀粉含量随果实成熟阶段的变化及其品种差异

淀粉在香蕉果实的早期发育阶段扮演着关键角色。通过对香蕉样品中淀粉含量的测定,结果发现(表 8),在 S1 阶段,‘Pome’的淀粉含量最高,约为 55%,依次是‘Red’、‘Kema’、‘Silk’、‘YNS’、‘Golden finger’、‘Maixiang’、和‘Lady finger’,其中,‘Lady finger’的含量最低,仅为 20.43%。然而,在 S2 期,淀粉含量显著下降,但‘Pome’仍然保持较高的淀粉含量,为 27.571%。排列顺序为‘Pome’>‘YNS’>‘Maixiang’>‘Kema’>‘Golden finger’>‘Silk’>‘Red’>‘Lady finger’。这表明‘Pome’的淀粉含量相对较高,而且其可溶性糖含量不逊色于其他品种,因此更适合用于加工香蕉面包、糕点等产品。到了 S3 期,淀粉含量显著减少,转化为其他糖类成分,但‘Pome’仍然保持相对较高的淀粉含量,为 7.964%。与之相比,除了‘Pome’之外的所有品种淀粉含量都明显下降,且无显著差异。排列顺序为‘Pome’>‘YNS’>‘Maixiang’>‘Kema’>‘Silk’>‘Red’>‘Golden finger’>‘Lady finger’,其中‘Lady finger’的淀粉含量最低,仅为 0.072%。本研究对不同香蕉品种中淀粉含量的变化进行了详细的调查,发现‘Pome’在各个阶段都表现出相对较高的淀粉含量,尤其适合用于加工食品制造。

2.2 香蕉果实成熟度与营养成分的关联性分析

为了解不同品种及成熟阶段对香蕉品质的影响,分析了果实成熟度与可溶性糖、脂肪、果胶、可

表8 不同香蕉品种3个成熟阶段的淀粉含量

Tab. 8 Comparison of starch content in different banana varieties and ripening stages %

品种 Accession Name	成熟阶段 Ripening stages		
	S1	S2	S3
‘Lady finger’	20.43 ± 0.37g	5.50 ± 0.25f	0.07 ± 0.02b
‘Golden finger’	43.59 ± 0.43e	10.27 ± 0.69d	0.16 ± 0.06b
‘Maixiang’	28.35 ± 0.92f	13.41 ± 0.72bc	1.21 ± 0.05b
‘Red’	48.19 ± 0.15c	7.32 ± 0.35ef	0.48 ± 0.35b
‘YNS’	44.79 ± 2.67de	15.78 ± 0.29b	2.07 ± 0.15b
‘Silk’	44.99 ± 1.94de	10.07 ± 0.54de	0.68 ± 0.07b
‘Kema’	46.75 ± 2.15cd	12.07 ± 0.70cd	0.95 ± 0.04b
‘Pome’	54.77 ± 1.31b	27.57 ± 0.72a	7.96 ± 0.44a

滴定酸和淀粉之间的关系(图2)。结果表明,可溶性糖与果实成熟度呈正相关($R=0.94$),随着果实成熟度的增加,可溶性糖的含量也增加。这可能是由于果实成熟过程中,糖分解和合成的变化导致可溶性糖含量的增加。进一步分析显示,可溶性糖与果胶和可滴定酸之间呈正相关($R=0.71$)。这表明可溶性糖的增加与果胶和可滴定酸的含量增加有关。果胶和可滴定酸是果实成熟过程中重要的化学成分,其含量的增加与可溶性糖的积累和代谢有关。另外,果胶和可滴定酸之间也呈正相关($R=0.76$)。这意味着果胶含量的增加伴随着可滴定酸含量的增加。果胶和可滴定酸在果实成熟过程中起着重要的调节和稳定作用。结果还发现,淀粉与果实成熟度呈负相关($R=-0.89$)。随着果实成熟度的增加,淀粉的含量降低。这是由于

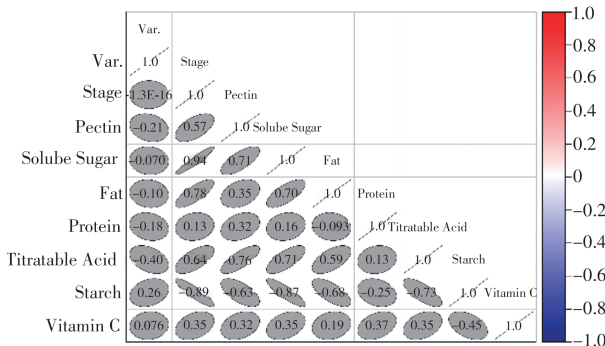


图2 品质和不同成熟时期之间的相关性分析图

Fig. 2 Correlation analysis plot between quality and different ripen stage

香蕉果实成熟过程中,淀粉被分解为可溶性糖,从而导致淀粉含量的减少。最后,淀粉与可溶性糖($R=-0.87$)和可滴定酸($R=-0.73$)之间呈负相关。这表明淀粉含量的减少伴随着可溶性糖和可滴定酸含量的增加。这是由于淀粉转化为可溶性糖和可滴定酸的过程导致了它们之间的负相关性。综上所述,通过相关性分析,发现果实成熟度与可溶性糖、脂肪、果胶、可滴定酸和淀粉之间存在一定的关联性。它们的正相关性反映了它们在果实成熟过程中的协同作用。

2.3 基于不同品种和成熟期的PCA分析 主成分分析(PCA)被应用于8个香蕉品种在3个成熟阶段(S1至S3)的果实成分数据中,以揭示其营养特性和加工潜力的内在联系。分析结果显示,主成分PC1和PC2对解释果实成分的方差贡献最大,分别占总方差的53.6%和15.0%,有效概括了香蕉果实化学成分的主要变异方向(图3-A)。PC1显著与果胶、蛋白质和维生素C正相关,这些营养成分对于促进健康至关重要,如维护肠道健康、提升免疫力。品种如‘Lady Finger’和‘Silk’在PC1上呈现正向分布,表明它们在S2成熟期具有相似的高营养价值特性,为特定营养导向的产品开发提供了品种选择依据。另一方面,PC2主要由淀粉含量驱动,尤其是在S1阶段,‘Golden Finger’、‘Silk’和‘Kema’品种显示出高淀粉积累,这与香蕉果实早期发育阶段相符。高淀粉含量使得这些品种在食品加工和工业应用上具有特殊价值,尤其是淀粉的糊化特性在加工中的应用。此外,PC4强调了脂肪、可滴定酸和可溶性糖在决定果实加工特性和口感方面的重要性,特别是在S3期的‘Golden Finger’品种中,这些成分含量较高,对于开发如果酱等加工品具有指向意义,因其影响着产品的风味、色泽和保质期。

通过整合不同成熟阶段的PCA结果(图3-B),本研究不仅明确了各品种在不同成熟期的营养特征,还揭示了它们在加工应用上的差异化优势。例如,第1象限(PC1正、PC2负)代表了S2期富含果胶、蛋白质和维生素C的品种(如‘Lady finger’和‘Silk’),而第4象限(PC1负、PC2正)则突出S3期高脂肪、可滴定酸和可溶性糖的‘Golden finger’适合加工成果酱类产品。

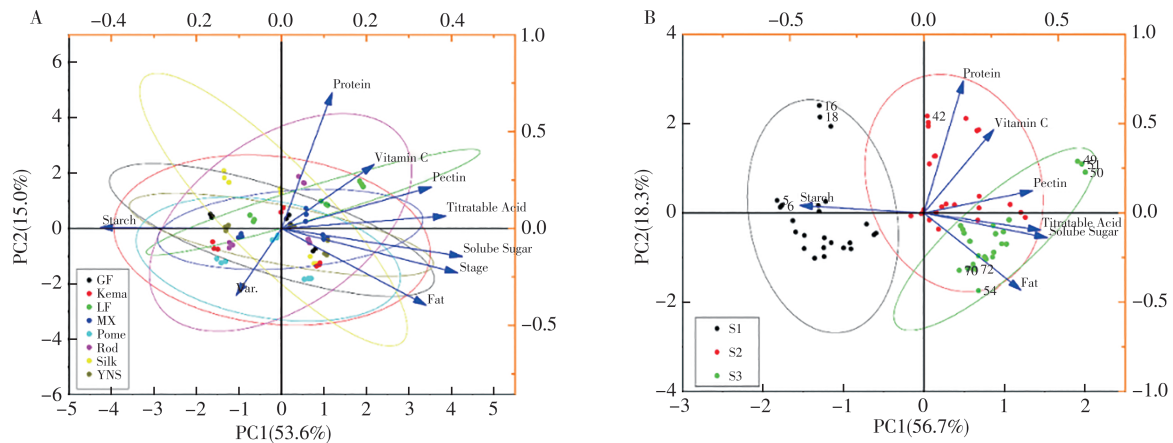


图3 基于不同香蕉品种和成熟时期的主成分分析

A: 香蕉品种和营养成分主成分分析图; B: 香蕉成熟时期和营养成分主成分分析图。

Fig. 3 Principal Component Analysis Based on Different Banana Varieties and Ripening Periods

A: Principal component analysis plot of banana varieties and nutrient components; B: Principal component analysis plot of banana ripening period.

3 讨论

在本研究对不同香蕉品种在不同成熟阶段的营养成分动态变化进行了分析,探讨其对香蕉品质的影响。结果发现,可溶性糖在香蕉成熟过程中显著积累,这一现象与淀粉降解和糖合成的生理过程密切相关,这与之前的一些研究相一致^[16-20]。品种间在成熟期S3的可溶性糖含量表现出显著差异,这一结果可能与遗传背景、酶活性变化及环境因素如温度和光照有关^[21]。此外,农业管理措施,如灌溉和施肥策略,也可能影响可溶性糖的积累,从而影响香蕉的口感、风味和市场竞争力。果胶含量的逐渐增加,尤其是在S1期的‘Pome’品种中,表明果胶在香蕉成熟过程中发挥的重要作用,这也印证了其在作为食品工业中重要的稳定剂和增稠剂的潜在应用价值^[22]。脂肪含量的差异,特别是在‘Maixiang’和‘Pome’品种中观察到的变化,且这些差异在香蕉的成熟过程中呈现特定的变化趋势。脂肪含量的变化可能与成熟过程中脂肪代谢的动态变化密切相关,这一过程中涉及到多种酶的活性调节和基因表达的变化^[23]。蛋白质含量的波动,以及可滴定酸含量在不同品种和成熟期之间的显著差异,直接影响香蕉的口感和风味^[24-25]。特别是‘Lady finger’品种在S2和S3期的高可滴定酸含量,可能与其独特口感

和营养特性相关。维生素C的含量对人体健康具有重要作用,能够增强机体的抗病能力,加速创口愈合,并具有软化血管的功效^[26]。本研究发现,未成熟的香蕉果肉含有丰富的抗性淀粉,尤其是‘Pome’品种。香蕉淀粉具有消化缓慢的特点,对食品产业、医药产业和纺织工业等领域具有重要价值^[27],更多地了解香蕉中的总淀粉特性变化规律将为提高香蕉附加值奠定基础。然而,本研究尚未全面探讨所有理化指标的遗传控制机制,以及农业管理实践对这些指标的具体影响。未来的研究需要更深入地分析这些因素如何独立和共同作用于香蕉果实的理化指标,并探索如何通过精确调控来优化香蕉的品质和市场价值。

本研究通过综合分析不同香蕉品种在各个成熟阶段的营养成分动态变化特征,揭示了品种、成熟度与香蕉品质特性之间的复杂关系。研究表明,可溶性糖、果胶、脂肪、蛋白质和可滴定酸等关键组分在成熟过程中的变化,对香蕉的营养价值和加工适用性具有显著影响。此外,本研究还强调了主成分分析(PCA)在评估和区分不同品种香蕉果实成分中的价值,为香蕉的加工和市场定位提供了新的视角。本研究不仅丰富了对香蕉成熟过程中化学成分变化的理解,而且为香蕉产业的可持续发展、产品多样化和质量控制提供了实用的指导。

参考文献:

- [1] WANG X, WANG A, LI Y, et al. A novel banana mutant "RF 1 (*Musa* spp. ABB, pisang awak subgroup) for improved agronomic traits and enhanced cold tolerance and disease resistance [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 730718.
- [2] 谢江辉. 新中国果树科学研究70年: 香蕉[J]. *果树学报*, 2019, 36(10): 1429-1440.
- [3] ZHOU N, CHEN H, XI J, et al. Biochars with excellent Pb (II) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via hydrothermal carbonization [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 232: 204-210.
- [4] 李敬阳, 王甲水, 唐粉玲, 等. 香蕉果实营养差异及其对人体膳食摄入量贡献评价[J]. *热带作物学报* 2015,36(1): 174-178.
- [5] DOUNGPORN A, VACHIRA C, KANJANA N, et al. Bioactive compounds and antioxidant properties of banana inflorescence in a beverage for maternal breastfeeding [J]. *Applied Sciences*, 2020, 11(1): 343.
- [6] ARVANITOYANNIS I S, MAVROMATIS A. Banana cultivars, cultivation practices, and physicochemical properties [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2009, 49(2): 113-135.
- [7] SHALINI R, ANTONY U. Fructan distribution in banana cultivars and effect of ripening and processing on Nendran banana [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 8244-8251.
- [8] CAMPUZANO A, ROSELL C M, CORNEJO F. Physicochemical and nutritional characteristics of banana flour during ripening [J]. *Food Chemistry*, 2018, 256: 11-17.
- [9] KIM I H, CAO H, HANCOCK J D, et al. Effects of processing and genetics on the nutritional value of *Sorghum* in chicks and pigs-review[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2000, 13(9): 1337-1344.
- [10] KUMAR P S, SARAVANAN A, SHEEBA N, et al. Structural, functional characterization and physicochemical properties of green banana flour from dessert and plantain bananas (*Musa* spp.) [J]. *LWT*, 2019, 116: 108524.
- [11] SHALE K, MUKAMUGEMA J, LUES R J, et al. Possible microbial and biochemical contaminants of an indigenous banana beer Urwagwa: a mini review [J]. *African Journal of Food Science*, 2014, 8(7): 376-389.
- [12] FALADE K O, OYEYINKA S A. Color, chemical and functional properties of plantain cultivars and cooking banana flour as affected by drying method and maturity [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 816-828
- [13] OFOEDU C E, UBBAONU C N, AGUNWAH I M, et al. Production and comparative evaluation of leather products from pawpaw (*Carica papaya*) and banana (*Musa acuminata*) fruit pulp [J]. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 2020, 12(2): 218-228.
- [14] 洪佳敏, 何炎森, 郑菲艳, 等. 香蕉产品加工技术研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2016, 32(34): 180-186.
- [15] 庞荣丽, 张巧莲, 郭琳琳, 等. 水果及其制品中果胶含量的比色法测定条件优化 [J]. *果树学报*, 2012, 29(2): 302-307.
- [16] NWANNA E E, IBUKUN E O, OBOH G. Nutritional content of selected species of tropical eggplant fruit (*Solanum* spp) diet Attenuates hepatic inflammation in high-fat fed male Wistar rats induced with streptozotocin [J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(1): 109-119.
- [17] MHATRE S V, BHAGIT A A, YADAV R P. Proteinaceous pancreatic lipase inhibitor from the seed of *Litchi chinensis* [J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2019, 57(1): 113-118.
- [18] NINIO R, LEWINSOHN E, MIZRAHI Y, et al. Changes in sugars, acids, and volatiles during ripening of koubo [*Cereus peruvianus* (L.) Miller] fruits[J]. *Journal Agricultural Food Chemistry*, 2003,51(3): 797-801.
- [19] KETSA S, WISUTIAMONKUL A. Postharvest physiological disorders of banana fruit: Finger drop, senescent spotting, and chilling injury[J]. *Horticultural Reviews*, 2022, 49: 97-169.
- [20] LI J, LIU F, YU H, et al. Diverse banana pseudostems and *Rachis* are distinctive for edible carbohydrates and lignocellulose saccharification towards high bioethanol production under chemical and liquid hot water pretreatments [J]. *Molecules*, 2021, 26(13): 3870.
- [21] DE JESUS FILHO M, DO CARMO L B, DELLA LUCIA S M, et al. Banana liqueur: Optimization of the alcohol and sugar contents, sensory profile and analysis of volatile compounds [J]. *LWT*, 2018, 97: 31-38.
- [22] PEREIRA G A, ARRUDA H S, MOLINA G, et al. Extraction optimization and profile analysis of oligosaccharides in banana pulp and peel [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(1): e13408.
- [23] AMBUKO J, SEKOZAWA Y, SUGAYA S, et al. A comparative Evaluation of Postharvest Quality Attributes of Two Banana (*Musa* spp) Varieties as Affected by Preharvest Production Conditions [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2013, 5(3): 55-58.
- [24] TOLEDO T T, NOGUEIRA S B, CORDENUNSI B R, et al. Proteomic analysis of banana fruit reveals proteins that are differentially accumulated during ripening [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 70: 51-58.
- [25] REDDY C K, HARIPRIYA S, VIDYA P V. Morphology, physico-chemical and functional characteristics of starches from different banana cultivars [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(11): 7289-7296.
- [26] NEPAL N, YACTAYO-CHANG J P, MEDINA-JIMÉNEZ K, et al. Mechanisms underlying the enhanced biomass and abiotic stress tolerance phenotype of an *Arabidopsis* MIOX over-expresser [J]. *Plant Direct*, 2019, 3(9):

e00165.

[27] WANG J S, WANG A B, MA W H, et al. Comparison of physicochemical properties and *in vitro* digestibility of

starches from seven banana cultivars in China [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121: 279–284.

Multi-component principal component analysis and nutritional value Assessment of Banana Varieties

CHCN Yan^{1,2}, WANG Yaling², LI Chunfang^{1,2}, WANG Anbang^{1,3}, LI Yujia^{1,3}, LI Jingyang^{1,3,4}

(1. Tropical Crop Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China;

2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 611101, China; 3. Haikou Experimental Station, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan, 571101, China; 4. Hainan Healthy Banana Plant Propagation

Technology Research Center, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: The variations in nutritional composition and physicochemical properties among different banana varieties are crucial for their processing purposes. However, inadequate understanding of the nutritional composition and physicochemical properties of many banana varieties currently restricts the potential for in-depth processing and utilization of diverse banana varieties. To delve into the potential application value of bananas, a ripening time series experiment was conducted for deep analysis of the physicochemical characteristics and nutritional value of eight different banana varieties at three stages of ripening. Principal component analysis (PCA) of multi-components of banana fruits found that there was a significant change in soluble sugar content among varieties as ripeness increased, with the Lady Finger variety being the highest in soluble sugar content (22.75%) at the third ripening stage (S3), while the Pome variety being the highest in starch content (54.77%) at the first ripening stage (S1). Starch content decreased with ripeness, and was still 7.96% in the Pome variety at full ripeness. Moreover, the contents of pectin and titrable acidity were closely related to soluble sugar, and the contents of fat, protein, titrable acidity, and vitamin C were observed significantly different in varieties at different ripening stages. PCA analysis revealed significant differences in the composition of banana fruits of different varieties at different ripening stages, providing a scientific basis for selecting suitable varieties and ripening stages for processing.

Keywords: banana varieties; chemical composition; ripeness; nutritional value; quality

(责任编辑:潘学峰)