

覃翠钠,李志春,何雪梅,等. 基于成熟度研究不同品种香蕉多酚含量及抗氧化活性的差异 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 52–60. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010108

QIN Cuina, LI Zhichun, HE Xuemei, et al. Polyphenol Content and Antioxidant Capacity from Banana with Different Varieties and Maturity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 52–60. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010108

· 研究与探讨 ·

基于成熟度研究不同品种香蕉多酚含量及抗氧化活性的差异

覃翠钠¹,李志春^{1,2,3,*},何雪梅^{1,2,3},唐杰¹,李丽^{1,2,3},易萍^{1,2,3},辛明^{1,2,3},孙健^{2,3,4,*}

(1.广西农业科学院农产品加工研究所,广西南宁 530007;

2.广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室,广西南宁 530007;

3.广西香蕉保鲜与加工工程技术研究中心,广西南宁 530007;

4.广西农业科学院,广西南宁 530007)

摘要:为评价新品种 GC30 加工蕉的抗氧化功效,开发其相关产品,拓宽香蕉产业链,本文以 GC30 加工蕉和 4 个主栽品种 GC02 天宝高蕉、GC07 鸡蕉、GC09 粉蕉、GC25 大蕉为对象,研究不同成熟度(1 级和 7 级,1 级全果呈暗绿色,7 级全果呈黄色)下香蕉皮、肉及果的多酚含量和抗氧化活性,并基于主成分分析法,对不同品种及成熟度香蕉抗氧化活性进行综合评价。结果表明,所有品种的香蕉皮多酚含量均最高($P<0.01$),7 级香蕉皮、肉的多酚含量与其 1 级的没有显著性差异($P>0.05$),不同品种的香蕉皮多酚含量具有显著性差异($P<0.05$),其中 7 级 GC30 香蕉皮的多酚含量最高;不同品种的香蕉果、肉、皮的 DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基清除能力和抑制羟自由基能力没有显著性差异($P>0.05$),所有品种的 7 级香蕉皮、肉、果的 DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基清除能力和抑制羟自由基能力极显著高于其 1 级香蕉皮、肉、果($P<0.01$);所有品种的香蕉皮金属螯合率极显著大于香蕉果、肉($P<0.01$),而品种和成熟度对香蕉皮、肉、果的金属螯合率没有显著影响($P>0.05$);不同品种熟香蕉果、肉、皮的抗氧化活性优于生香蕉果、肉、皮的抗氧化活性,其中 7 级 GC30 香蕉皮抗氧化活性综合评价排名最高。通过对不同品种和成熟度香蕉的功效成分及抗氧化能力的研究,为香蕉品种的选育、分级分类加工与应用提供理论依据,对增加香蕉产业的收益具有重要意义。

关键词:香蕉,品种,成熟度,多酚,抗氧化活性

中图分类号:TS255

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2022)22-0052-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010108



本文网刊:

Polyphenol Content and Antioxidant Capacity from Banana with Different Varieties and Maturity

QIN Cuina¹, LI Zhichun^{1,2,3,*}, HE Xuemei^{1,2,3}, TANG Jie¹, LI Li^{1,2,3}, YI Ping^{1,2,3}, XIN Ming^{1,2,3}, SUN Jian^{2,3,4,*}

(1. Agro-food Science and Technology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-processing Technology, Nanning 530007 China;

3. Guangxi Banana Preservation and Processing Research Center of Engineering Technology, Nanning 530007 China;

4. Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: In order to evaluate the antioxidant capacity of the new variety GC30 processed bananas, develop their functional

收稿日期: 2022-01-14

基金项目: 国家香蕉产业技术体系项目(CARS-31);国家自然科学基金项目(31860579);广西自然科学基金(2019GXNSFAA185027);广西农业科学院基本科研业务费项目(桂农科 2021YT116)。

作者简介: 覃翠钠(1994-),女,硕士,研究方向:生物质转化与利用技术,E-mail: qincn@gxaas.net。

*** 通信作者:** 李志春(1981-),女,硕士,副研究员,研究方向:农产品加工及副产物饲料化研究工作,E-mail: lizhichun@gxaas.net。

孙健(1978-),男,博士,研究员,研究方向:农产品贮藏与加工研究工作,E-mail: jiansun@gxaas.net。

products and broaden the banana industry chain, five representative banana varieties including GC02 Tianbaogao bananas, GC07 chicken bananas, GC09 powder bananas, GC25 big bananas and GC30 processed bananas were used to study. Specifically, this paper was to analyze the total phenol content and antioxidant capacities of banana peel, pulp and fruit with different varieties and maturity, as well as to statistically analyze antioxidant capacities of different banana varieties and maturity using principal component analysis. The results showed that banana peel had the highest phenol content ($P<0.01$), and the phenol content of banana peel, pulp and fruit at grade-7 maturity were not significantly different from that at grade-1 maturity. However, the phenol content in banana peel of different varieties was significantly different ($P<0.05$). In particular, GC30 banana peel at grade-7 maturity had the highest phenol content compared with the other banana varieties. Additionally, the DPPH, superoxide anion and hydroxyl free radical scavenging activities had no significant differences among banana peel, fruit and pulp ($P>0.05$). The scavenging activities on DPPH, superoxide anion and hydroxyl free radicals of banana peel, pulp and fruit at grade-7 maturity was significantly higher than that at grade-1 maturity ($P<0.01$). The metal chelation rate of banana peel was significantly higher than that of banana fruit and pulp ($P<0.01$), while there was no significant effect on the metal chelation rate of banana peel, pulp and fruit between variety and maturity ($P>0.05$). Moreover, the antioxidant activities of banana fruit, pulp and peel with different varieties at grade-7 maturity were better than those of fruit, pulp and peel at grade-1 maturity. The GC30 banana peel at grade-7 maturity had the strongest antioxidant properties in the comprehensive evaluation of antioxidants. The findings of this research could provide a theoretical basis for the breeding, processing and application of banana varieties, and promote the commercial value of banana.

Key words: banana; variety; maturity; polyphenol content; antioxidant capacity

香蕉是芭蕉科芭蕉属植物,其果实成熟后口感香甜,富含营养成分^[1-2]。香蕉是我国四大水果之一,截止到 2020 年,全国香蕉种植面积达到 32.6 万 hm^2 ,产量 1153.1 万吨,中国香蕉总产量已居世界第二位。目前,世界上香蕉的栽培品种近 300 多个,可分为鲜食蕉、煮食蕉和菜蕉三类。中国主要的鲜食蕉有香牙蕉(AAA)、粉蕉(ABB)、大蕉(ABB)、龙牙蕉(AAB)和贡蕉(AA) 5 个种类^[3]。近年来由于加工用途的需要,不同特性的新品种相继被培育出来。GC30 加工蕉是源于非洲的新粮用型蕉,国内目前在广州、广西、云南等地进行推广种植,其富含抗性淀粉、多酚等健康成分,营养价值远高于以香牙蕉为主的鲜食蕉,具有很大的应用前景,但是国内有关加工蕉的研究相对较少。

香蕉果肉及果皮都含有多酚、单宁等有效成分,其中多酚是一种具有抗氧化^[4-5]、抗菌^[6-7]、预防心血管疾病^[8]、抗抑郁^[9]等功效的物质。李哲^[10]和齐静^[11]等研究发现香蕉皮多酚对油脂的过氧化有较好的抑制作用。有研究者发现,香蕉及香蕉皮的抗氧化能力与其多酚含量具有相关性^[12-14]。冯尚坤^[15]研究表明香蕉皮提取物浓度与其抑制肝线粒体脂质过氧化程度呈正相关。而香蕉和香蕉皮的多酚含量受品种及成熟度的影响^[16-17]。李健等^[18]研究 5 个蕉类品种在果实催熟过程中多酚含量变化时,发现 5 个蕉类品种果实的多酚含量有差异,且较催熟前均有所提高。郝俊光等^[19]研究表明总酚含量在香蕉成熟过程中呈下降趋势,而过熟果皮的降幅则高达 52%。GC30 加工蕉是新品种,关于其活性成分及抗氧化活性还没有明确的报道。因此,对新品种 GC30 加工蕉的果、肉和皮的活性成分和抗氧化活性与主栽品种做一个对比研究,有助于其相关产品的开发与应用。

本文以新品种 GC30 加工蕉和 4 个主栽品种

(GC02 天宝高蕉(香芽蕉)、GC07 鸡蕉(贡蕉)、GC09 粉蕉、GC25 大蕉)为对象,研究其不同成熟度下功效成分及抗氧化活性,并选择 4 个抗氧化指标进行主成分分析,对不同成熟度下不同品种香蕉果、肉、皮的抗氧化活性进行综合评价,突出对比新品种 GC30 加工蕉与其它品种的抗氧化活性差异,为新品种的选育、开发香蕉相关产品,拓宽香蕉产业奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香蕉 广西壮族自治区南宁市武鸣里建基地香蕉种质资源圃,按照树上 8 成熟的标准分别采取新鲜生香蕉共 5 个品种(GC02 天宝高蕉、GC07 鸡蕉、GC09 粉蕉、GC25 大蕉、GC30 加工蕉),每个品种 10 kg。参考 Kanazawa 等^[20]和 Zhang 等^[21]以果实的颜色定义各种采后成熟阶段如表 1 所示,本试验采用 1 级和 7 级香蕉;DPPH 分析纯, Sigma 公司;无水乙醇、抗坏血酸、 Na_2CO_3 、没食子酸 分析纯,

表 1 香蕉皮颜色与成熟阶段的对照

Table 1 The banana at different stages as classified by the color of banana peel

成熟阶段	果皮颜色	成熟所需时间(d)
1	全果暗绿色	2
2	全果绿色	5
3	绿色中有少许黄色,外层开始变黄,内层仍绿	9
4	绿色多于黄色	13
5	黄色多于绿色	16
6	黄色,果尖带绿	19
7	全果黄色	21
8	黄色带少许褐色斑点	24
9	黄色且褐色斑点较多	28

天津大茂; Ferrozine(97%) 分析纯, 阿拉丁; 氯化亚铁 分析纯, 天津科隆; 超氧阴离子自由基试剂盒和羟基自由基试剂盒 南京建成科技有限公司。

UV-1800 紫外分光光度计 上海美析仪器责任有限公司; TP5002 精密电子天平 上海佑科仪器仪表有限公司; BSA1245 分析天平 Sartorius Group; HH-S4 数显恒温水浴锅 金坛市万华实验仪器厂; TG16-WS 高速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的前处理 取回的全绿香蕉(1级)每个品种取香蕉果、肉、皮各 0.5 kg 分别打浆加水至 2 L, 每个样品分装成 5 小袋保存于 -20°C 冰箱。其次, 取回的青香蕉自然放置待成熟至全黄(7级), 每个品种取香蕉果、肉、皮各 0.5 kg 分别打浆加水至 2 L, 每个样品分装成 5 小袋保存于 -20°C 冰箱。5 个品种, 两个成熟度共 30 个样品。

1.2.2 多酚含量的测定 多酚含量的测定参考 Folin 酚法^[22]。标准曲线制作: 分别取 0.02 mg/mL 没食子酸 0、0.2、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 mL 于 10 mL 容量瓶中, 加入 1 mL 福林酚试剂和 3 mL 7.5 g/100 mL Na_2CO_3 溶液, 用纯水定容, 摇匀, 黑暗处理 2 h, 采用紫外分光光度计在波长 765 nm 下测定吸光值。以没食子酸浓度为横坐标, 吸光值为纵坐标拟合, 得到标准曲线方程为 $y=0.2533x+0.0367$, R^2 为 0.9990。结果以没食子酸当量表示(mg GAE/g)。

样品测定: 与标准曲线测定方法一致, 取 1 mL 样品代替没食子酸即可。

1.2.3 抗氧化活性测定

1.2.3.1 DPPH 自由基清除率 参照郑凤锦等^[23]的方法, 取试样于离心管中, 加入 2.0 mL 6.5×10^{-5} mol/L DPPH 溶液, 摇匀, 黑暗处理 30 min, 取上清液于波长 517 nm 处测吸光值(A_1); 另取上述试样于离心管中, 加入 2.0 mL 无水乙醇, 摇匀, 黑暗处理 30 min, 在波长 517 nm 处测其吸光值(A_2); 取 2.0 mL 无水乙醇代替试样反应为参比, 其吸光值记为(A_0); 同时以 V_c (20 mmol/L)为对照。测定 3 次平行取平均值, 清除率计算公式如下:

$$w_1(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中: w_1 表示 DPPH 自由基清除率, %。

1.2.3.2 超氧阴离子自由基清除能力 超氧阴离子自由基清除能力测定采用超氧阴离子自由基试剂盒。

1.2.3.3 抑制羟自由基能力 抑制羟自由基能力测定采用羟基自由基试剂盒。

1.2.3.4 金属螯合率 金属螯合率测定使用 FeCl_2 溶液与 Ferrozine 显色法^[23]。取试样于离心管中, 加入 1.0 mL 的 2.0 mmol/L FeCl_2 溶液及 0.2 mL 的 0.5 mmol/L Ferrozine 试剂, 混匀, 室温下静置反应

10 min 后, 于波长 562 nm 处测定吸光值(A_s); 用纯水替代 Ferrozine 试剂测得吸光值(A_e); 空白试验用纯水替代试样, 测得吸光值(A_r)。同时以 EDTA 替代试样为对照, 重复测定 3 次, 金属离子螯合率 $w_2(\%)$ 计算公式如下:

$$w_2(\%) = \left(1 - \frac{A_s - A_e}{A_r}\right) \times 100$$

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理, 采用 SPSS 21.0 数据处理软件进行差异显著性分析、相关性分析及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 多酚含量的测定结果

香蕉中活性成分多酚具有抗氧化性, 对多种自由基具有良好的清除效果。香蕉的多酚含量测定结果及方差分析分别如图 1 及表 2 所示。香蕉皮的多酚含量极显著高于其香蕉肉和果($P<0.01$), 其中, 7 级成熟度皮中多酚含量是整果的 2.00~9.74 倍、是果肉的 2.79~15.52 倍; 1 级成熟度香蕉皮中多酚含量是整果的 3.44~5.88 倍、是果肉的 6.26~13.15 倍。香蕉是呼吸跃变型水果, 在成熟过程中多酚含量的变化会受到外源激素的诱导。高鹏钊等^[24]和 Lim 等^[25]研究发现香蕉皮的多酚含量高于果实, Sulaiman 等^[26]和 Faller 等^[27]报道香蕉皮的多酚含量是其果实的 1.5~3.4 倍。成熟度对香蕉皮、肉、果的多酚含

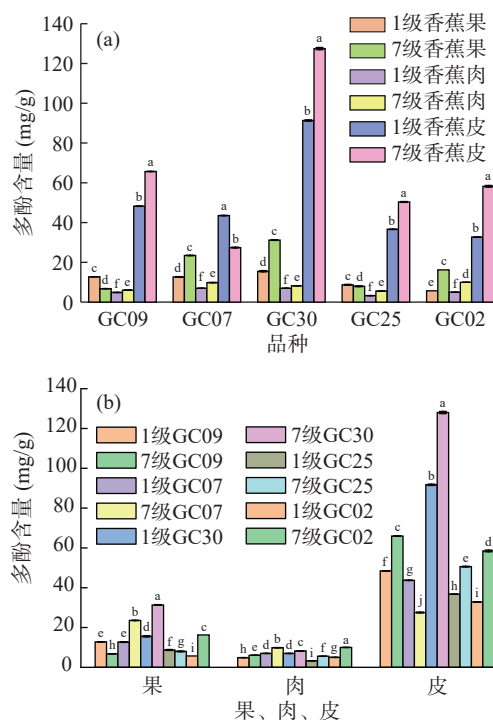


图 1 不同品种及成熟度的香蕉中多酚含量变化

Fig.1 Changes of polyphenol content in bananas of different varieties and maturity

注: (a)中, 不同英文小写字母表示同一个品种果、肉、皮间差异在 $P<0.05$ 水平具有统计学意义; (b)中, 不同英文字母表示果、肉、皮中不同品种间在 $P<0.05$ 水平具有统计学意义。

表 2 不同品种及成熟度的香蕉中多酚含量主体间效应检验
Table 2 Inter-subject test of polyphenol content in bananas of different varieties and maturity

源	III 型平方和	df	均方	F	P
校正模型	19378.443 ^a	7	2768.349	11.373	0.000
截距	20923.060	1	20923.060	85.954	0.000
品种	3262.088	4	815.522	3.350	0.028
成熟度	481.834	1	481.834	1.979	0.173
果、肉、皮	15634.522	2	7817.261	32.114	0.000
误差	5355.253	22	243.421		
总计	45656.757	30			
校正的总计	24733.696	29			

注: a. $R^2=0.783$ (调整 $R^2=0.715$); $P<0.05$ 表示具有显著性差异, $P<0.01$ 表示具有极显著性差异。

量没有显著性影响($P>0.05$)。不同品种香蕉果、肉、皮的多酚均存在显著性差异($P<0.05$)。其中, 7 级 GC30 香蕉皮的多酚含量最高, 7 级 GC30 香蕉果、1 级 GC30 香蕉果、1 级 GC30 香蕉肉、1 级 GC30 香蕉皮的多酚含量在同类中最高, 而 7 级 GC30 香蕉肉的多酚含量在同类中排名第三。

2.2 不同品种及成熟度的香蕉抗氧化活性试验结果

2.2.1 不同品种及成熟度香蕉的 DPPH 自由基清除率 DPPH 自由基是一种很稳定的氮中心的自由基, 常用于抗氧化成分的体外抗氧化活性评价。不同品种及成熟度香蕉的 DPPH 自由基清除率及方差分析结果分别如图 2、表 3 所示。7 级香蕉皮、肉、果的 DPPH 自由基清除率极显著高于其 1 级香蕉皮、肉、果($P<0.01$)。其中, 7 级成熟度的整果、肉和皮的 DPPH 自由基清除率分别比 1 级成熟度的高 6.31~16.45%、3.70~13.29%、4.55~15.22%。根据方差分析结果, 香蕉果、肉、皮的 DPPH 自由基清除率没有显著性差异($P>0.05$), 这与相关文献的研究结果一致。黄素梅等^[28]研究结果表明成熟香蕉皮、果的 DPPH 自由基清除率高于未成熟香蕉皮、果, 且其 DPPH 自由基清除率与多酚含量呈正相关。Hang 等^[29]发现, 随香蕉成熟度增加, DPPH 自由基清除率

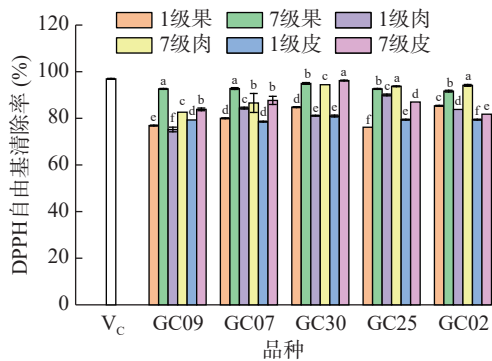


图 2 不同品种及成熟度的香蕉的 DPPH 自由基清除率
Fig.2 Scavenging activity on DPPH free radicals of banana form different varieties and maturity

注: 不同英文字母表示同一品种下不同成熟度间在 $P<0.05$ 水平具有统计学意义; 图 3~图 5 同。

表 3 不同品种及成熟度香蕉的 DPPH 自由基清除率主体间效应检验
Table 3 Inter-subject test of scavenging activity on DPPH free radicals of banana form different varieties and maturity

源	III 型平方和	df	均方	F	P
校正模型	855.796 ^a	7	122.257	8.460	0.000
截距	220298.952	1	220298.952	15244.460	0.000
品种	156.989	4	39.247	2.716	0.056
成熟度	627.238	1	627.238	43.404	0.000
果、肉、皮	71.569	2	35.785	2.476	0.107
误差	317.924	22	14.451		
总计	221472.672	30			
校正的总计	1173.720	29			

注: a. $R^2=0.729$ (调整 $R^2=0.643$); $P<0.05$ 表示具有显著性差异, $P<0.01$ 表示具有极显著性差异。

增强。不同品种香蕉皮、肉、果的 DPPH 自由基清除率没有显著性差异($P>0.05$)。因此, GC30 香蕉果、肉、皮的 DPPH 自由基清除率与其余四个品种相比没有表现出优势。

2.2.2 不同品种及成熟度香蕉的超氧阴离子自由基清除能力 超氧阴离子自由基是人体产生的活性氧自由基, 能引发体内脂质过氧化, 加快肌体衰老, 诱发皮肤病变、心血管疾病等, 严重危害人体健康, 而人体可以通过超氧化物歧化酶将其清除。由图 3 及

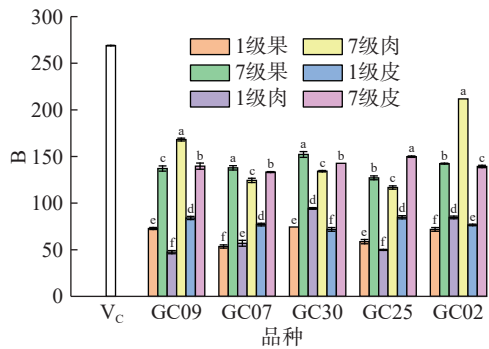


图 3 不同品种及成熟度香蕉的超氧阴离子自由基清除能力
Fig.3 Scavenging activity on super oxide anion free radicals of banana of different varieties and maturity

表 4 不同品种及成熟度香蕉的超氧阴离子自由基清除能力主体间效应检验
Table 4 Inter-subject test of Scavenging activity on super oxide anion free radicals of banana from different varieties and maturity

源	III 型平方和	df	均方	F	P
校正模型	42890.232 ^a	7	6127.176	18.845	0.000
截距	344606.146	1	344606.146	1059.902	0.000
品种	2406.563	4	601.641	1.850	0.155
成熟度	40187.714	1	40187.714	123.605	0.000
皮、肉、果	295.955	2	147.977	.455	0.640
误差	7152.863	22	325.130		
总计	394649.240	30			
校正的总计	50043.095	29			

注: a. $R^2=0.857$ (调整 $R^2=0.812$); $P<0.05$ 表示具有显著性差异, $P<0.01$ 表示具有极显著性差异。

表 4 可知,香蕉果、肉和皮的超氧阴离子自由基清除能力没有显著性差异($P>0.05$)。7 级香蕉皮、肉、果的超氧阴离子自由基清除能力极显著高于其 1 级香蕉皮、肉、果($P<0.01$)。其中,7 级成熟度的果、肉和皮的超氧阴离子自由基清除能力分别比 1 级成熟度的高 64.32~77.79、66.90~127.01、55.60~70.95 U/L。这可能是由于不同样品中 Vc、黄酮类化合物、超氧化物歧化酶的含量差异^[30]。不同品种香蕉皮、肉、果的超氧阴离子自由基清除能力没有显著性差异($P>0.05$),这表明 GC30 香蕉果、肉、皮的超氧阴离子自由基清除能力与其余四个品种相比没有表现出优势。

2.2.3 不同品种及成熟度香蕉的抑制羟自由基能力
羟自由基是氢氧根失去一个电子形成的,具有极强的氧化能力,可氧化破坏蛋白质、核酸、糖类、脂类等。相关研究表明,酚类物质、单宁类物质及黄酮与羟自由基清除能力相关。如王妙飞等^[31]研究发现,香蕉皮黄酮对羟自由基具有较强的清除能力。根据图 4 及表 5 可知,香蕉皮、肉和果的抑制羟自由基能力没有显著性差异($P>0.05$)。7 级香蕉果、肉、皮的抑制羟自由基能力均极显著高于 1 级香蕉果、肉、皮($P<0.01$)。其中,7 级成熟度的果、肉和皮的抑制羟自由基能力分别比 1 级成熟度的高 2.67~5.66、3.85~8.10、

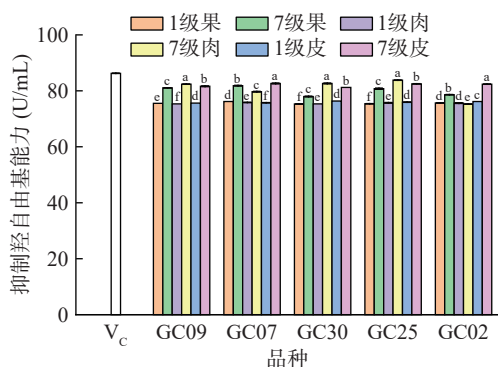


图 4 不同品种及成熟度香蕉的抑制羟自由基能力

Fig.4 Ability of inhibiting hydroxyl free radicals of different varieties and maturity bananas

表 5 不同品种及成熟度香蕉的抑制羟自由基能力主体间效应检验

Table 5 Inter-subject test of ability on inhibiting hydroxyl free radicals of banana from different varieties and maturity

源	III 型平方和	df	均方	F	P
校正模型	224.751 ^a	7	32.107	13.262	0.000
截距	184131.990	1	184131.990	76055.193	0.000
品种	10.603	4	2.651	1.095	0.384
成熟度	206.610	1	206.610	85.340	0.000
皮、肉、果	7.538	2	3.769	1.557	0.233
误差	53.263	22	2.421		
总计	184410.004	30			
校正的总计	278.014	29			

注: a. $R^2=0.808$ (调整 $R^2=0.747$); $P<0.05$ 表示具有显著性差异, $P<0.01$ 表示具有极显著性差异。

4.87~6.89 U/mL。不同品种香蕉皮、肉、果的抑制羟自由基能力没有显著性差异($P>0.05$),这表明 GC30 香蕉果、肉、皮的抑制羟自由基清除能力与其余四个品种相比没有表现出优势。此外,本文中 7 级香蕉皮、肉、果表现出与 Vc 相似的抑制羟自由基活性,说明其对羟自由基具有清除能力。

2.2.4 不同品种及成熟度的香蕉的金属螯合率
金属螯合率是体外抗氧化的测定指标之一,其抗氧化原理是通过螯合作用将金属离子包裹其中,阻止金属离子起作用,从而防止过量的铁导致脂质过氧化,诱发自由基和脂质过氧化物的产生^[32-33]。图 5、表 6 分别为香蕉金属螯合率测定及方差分析结果。香蕉皮的金属螯合率极显著大于香蕉果、肉($P<0.01$),7 级成熟度皮的金属螯合率是整果的 1.51~7.81 倍、是果肉的 3.48~6.96 倍;1 级成熟度皮的金属螯合率是果的 0.92~1.57 倍、是肉的 0.96~2.00 倍。陈途等研究蛇莓的抗氧化活性发现,铁螯合能力与总酚正相关^[34]。品种和成熟度对香蕉皮、肉、果的金属螯合率没有显著影响($P>0.05$)。GC30 香蕉果、肉、皮的金属螯合率与其余四个品种相比没有表现出优势。

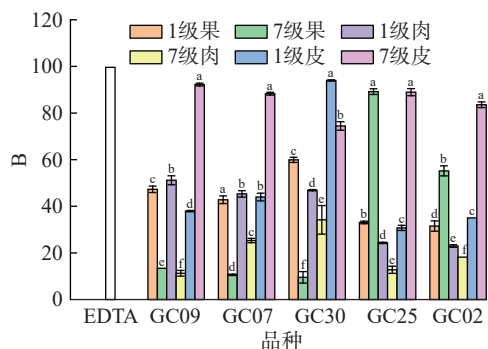


图 5 不同品种及成熟度香蕉的金属螯合率

Fig.5 Effects of banana from different varieties and maturity concentrations on chelation of the metal chelation rate

表 6 不同品种及成熟度香蕉的金属螯合率主体间效应检验

Table 6 Inter-subject test of chelation of metal chelation rate of banana from different varieties and maturity

源	III 型平方和	df	均方	F	P
校正模型	8319.479 ^a	7	1188.497	1.976	0.105
截距	61113.243	1	61113.243	101.627	0.000
品种	583.025	4	145.756	.242	0.911
成熟度	121.025	1	121.025	.201	0.658
皮、肉、果	7615.430	2	3807.715	6.332	0.007
误差	13229.612	22	601.346		
总计	82662.334	30			
校正的总计	21549.091	29			

注: a. $R^2=0.386$ (调整 $R^2=0.191$); $P<0.05$ 表示具有显著性差异, $P<0.01$ 表示具有极显著性差异。

2.2.5 基于主成分分析不同品种及成熟度香蕉的抗氧化活性
主成分分析法利用降维的思想,把多个指标转化为少数几个综合指标的一种多变量数据进行最佳综合简化的多元统计方法。以 DPPH 自由基清

除率、金属螯合率、超氧阴离子自由基清除能力、抑制羟自由基能力为指标进行主成分分析。首先将不同品种及成熟度的香蕉抗氧化指标测定结果进行相关性分析,其分析结果如表 7 所示。

由表 7 可知,DPPH 自由基清除率与超氧阴离子自由基清除能力、抑制羟自由基能力存在极显著相关性($P<0.01$),说明存在一个公因子模型,这个公因子模型对 DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基、抑制羟自由基都有贡献,但贡献的程度不同,所以有必要对 4 个抗氧化指标进行主成分分析。提取两个主成分进行分析,其特征值及累积贡献率如表 8 所示。

根据表 8 可知,主成分 1 的特征值为 2.233,方差贡献率为 55.817%,主成分 2 的特征值为 1.093,方差贡献率为 27.325%,两个主成分累积贡献率为 83.145%,很好的保留了 4 个抗氧化指标的原始信息。主成分分析载荷矩阵如表 9 所示。

由表 8 及表 9 可得抗氧化指标主成分分析得分载荷矩阵,如表 10 所示。

根据表 10 可得主成分 1 和主成分 2 得分模型分别如下式:

$$F_1 = 0.578X_1 + 0.014X_2 + 0.599X_3 + 0.566X_4 \quad \text{式 (1)}$$

$$F_2 = -0.245X_1 + 0.936X_2 - 0.036X_3 + 0.259X_4 \quad \text{式 (2)}$$

联立式(1)和式(2)可得 4 个抗氧化指标综合评价得分计算模型:

$$G = \frac{2.233F_1 + 1.093F_2}{2.233 + 1.093} \quad \text{式 (3)}$$

根据式 3 可得不同品种及成熟度香蕉的抗氧化活性综合评价及排名情况,如表 11 所示。

由图 6 可知,主成分 1 主要与 DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基清除能力、抑制羟自由基清除能力正相关,且主成分 1 占的权重较大,所以结合 DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基清除能力、

表 7 抗氧化活性指标相关性分析
Table 7 Analysis of the antioxidant activity evaluation factors

指标		DPPH自由基清除率	金属螯合率	超氧阴离子自由基清除能力	抑制羟自由基能力
DPPH自由基清除率	Pearson 相关性	1	-0.150	0.656**	0.543**
	显著性(双侧)		0.430	0.000	0.002
	N	30	30	30	30
金属螯合率	Pearson 相关性	-0.150	1	-0.011	0.193
	显著性(双侧)	0.430		0.953	0.307
	N	30	30	30	30
超氧阴离子自由基清除能力	Pearson 相关性	0.656**	-0.011	1	0.648**
	显著性(双侧)	0.000	0.953		0.000
	N	30	30	30	30
抑制羟自由基能力	Pearson 相关性	0.543**	0.193	0.648**	1
	显著性(双侧)	0.002	0.307	0.000	
	N	30	30	30	30

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 8 不同品种及成熟度香蕉的抗氧化指标主成分分析的特征值及累积贡献率
Table 8 Characteristic value and cumulative contribution rate of the antioxidant activity evaluation factors of banana of different varieties and maturity

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)	合计	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	2.233	55.817	55.817	2.233	55.817	55.817
2	1.093	27.328	83.145	1.093	27.328	83.145
3	0.365	9.124	92.269			
4	0.309	7.731	100.000			

表 9 不同品种及成熟度香蕉的抗氧化指标主成分分析载荷矩阵
Table 9 Main components loading matrix of the antioxidant activity

指标	成分	
	1	2
DPPH自由基清除率(X_1)	0.846	-0.256
金属螯合率(X_2)	0.021	0.976
超氧阴离子自由基清除能力(X_3)	0.895	-0.038
抑制羟自由基能力(X_4)	0.846	0.271

表 10 不同品种及成熟度香蕉的抗氧化指标主成分分析得分载荷矩阵

Table 10 Principal component load factor of the antioxidant activity indexes of banana of different varieties and maturity

指标	成分	
	1	2
DPPH自由基清除率(X_1)	0.578	-0.245
金属螯合率(X_2)	0.014	0.936
超氧阴离子自由基清除能力(X_3)	0.599	-0.036
抑制羟自由基能力(X_4)	0.566	0.259

表 11 不同品种及成熟度香蕉抗氧化能力指标综合评价价值及排名

Table 11 Comprehensive score and rankings of banana of different varieties and maturity

项目	成熟度	序号	品种	F_1	F_2	G	排名
香蕉果	1级	1	GC09	-1.80	0.20	-1.14	26
		2	GC07	-1.68	0	-1.13	25
		3	GC30	-1.09	0.31	-0.63	17
		4	GC25	-2.10	-0.26	-1.49	28
		5	GC02	-1.03	-0.65	-0.90	19
	7级	6	GC09	1.55	-1.16	0.66	11
		7	GC07	1.71	-1.20	0.76	10
		8	GC30	1.41	-1.65	0.41	14
		9	GC25	1.39	1.43	1.40	4
		10	GC02	1.12	0.11	0.78	9
香蕉肉	1级	11	GC09	-2.35	0.41	-1.44	27
		12	GC07	-1.29	-0.11	-0.90	19
		13	GC30	-1.14	-0.01	-0.77	18
		14	GC25	-0.92	-1.06	-0.96	20
		15	GC02	-1	-0.90	-0.97	21
	7级	16	GC09	1.33	-0.76	0.64	12
		17	GC07	0.58	-0.62	0.18	15
		18	GC30	1.97	-0.38	1.20	6
		19	GC25	1.86	-0.97	0.93	8
		20	GC02	1.71	-1.60	0.62	13
香蕉皮	1级	21	GC09	-1.41	-0.21	-1.02	22
		22	GC07	-1.55	0.04	-1.02	22
		23	GC30	-1.27	1.72	-0.29	16
		24	GC25	-1.33	-0.44	-1.04	24
		25	GC02	-1.40	-0.26	-1.03	23
	7级	26	GC09	0.93	1.93	1.26	5
		27	GC07	1.37	1.74	1.49	3
		28	GC30	2.02	0.81	1.62	1
		29	GC25	1.52	1.76	1.60	2
		30	GC02	0.88	1.78	1.17	7

抑制羟自由基清除能力的测定分析结果, 7 级的香蕉果、肉、皮的抗氧化活性指标综合评价价值较高。其中, 7 级 GC30 香蕉皮的抗氧化活性指标综合评价价值最高, 排名第一, 这与多酚含量的测定结果一致^[30]。其次, 7 级 GC30 香蕉肉排名第六, 在同类中排名最高。而级 GC30 香蕉果排名第十四, 在 7 级香蕉果中排名最后, 显示出比同类较差的抗氧化活性。此外, 1 级 GC30 香蕉皮、1 级 GC30 香蕉果、1 级 GC30 香蕉肉分列第十六、十七、十八名, 在 1 级香蕉皮、果、肉中显示了较好的抗氧化活性。

3 结论

所有品种的香蕉皮多酚含量显著高于果、肉, 且不同品种香蕉皮、肉、果的多酚含量具有显著性差异, 其中 1 级和 7 级 GC30 香蕉皮、肉、果(除 7 级

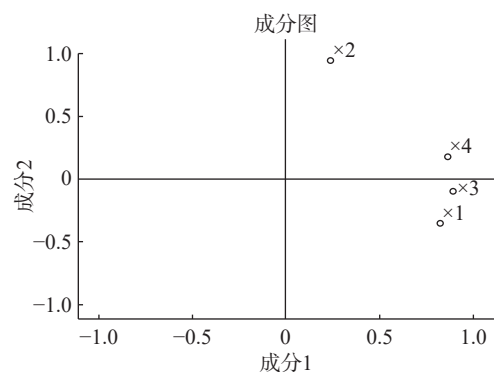


图 6 不同品种及成熟度香蕉抗氧化活性指标主成分分析载荷图

Fig.6 Main components loading diagram of antioxidant activity of banana of different varieties and maturity

GC30 香蕉肉)的多酚含量在同类中最高。所有品种的 7 级香蕉皮、肉、果相较于其 1 级具有较好的自由基清除能力,而 GC30 与其余 4 个品种的自由基清除能力没有显著性差异。所有品种的香蕉皮相比于果、肉具有较好的金属螯合率,GC30 与其余 4 个品种的金属螯合率没有显著性差异。GC30 香蕉果、肉、皮与同类相比,抗氧化活性综合评价排名较高,其抗氧化活性具有一定的优势。以上研究结果为香蕉分级分类加工与应用、开发香蕉产品提供数据支撑。

参考文献

- [1] 张苗,张洁,代斌.高剪切法提取香蕉皮总多酚的工艺优化[J].石河子大学学报(自然科学版),2020,38(2):133-140. [ZHANG M, ZHANG J, DAI B. Optimization of extraction technology of total polyphenols from banana peel by high shear[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2020, 38(2): 133-140.]
- [2] 贾宝珠,鲍金勇,杨公明.香蕉皮中功能性成分的研究进展[J].食品研究与开发,2014,35(14):128-134. [JIA B Z, BAO J Y, YANG G M. Advances on functional component of banana peel[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(14): 128-134.]
- [3] AURORE G, PARFAITB, FAHRASMANE L. Bananas, raw materials for making processed food products[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2009(20): 78-91.
- [4] 张兆英,张亚楠,彭伟盼.香蕉皮中总黄酮提取条件优化及抗氧化性能的研究[J].饲料研究,2019,42(9):68-72. [HANG Z Y, ZHANG Y N, PENG W P. Optimization of extraction conditions and oxidation resistance research of total flavonoid in banana peel[J]. *Feed Research*, 2019, 42(9): 68-72.]
- [5] 严业雄,黄琼慧,颜荣森,等.香蕉皮多酚提取及其抗氧化性研究[J].广东化工,2017,44(23):26-28. [YAN Y X, HUANG Q H, YAN R S, et al. The extraction of polyphenols from banana peel and their antioxidant activity research[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(23): 26-28.]
- [6] 沈建林,沈红元.香蕉多糖的抗菌活性研究[J].食品研究与开发,2015,36(18):69-71. [SHEN J L, SHEN H Y. Studies on antibacterial activity of banana polysaccharide[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(18): 69-71.]
- [7] 柯薇.香蕉皮中多酚类物质的抑菌活性研究[J].现代食品,2016(15):93-95. [KE W. Study on antimicrobial activity of polyphenols from banana peel[J]. *Modern Food*, 2016(15): 93-95.]
- [8] 洪佳敏,何炎森,郑云云,等.香蕉成分及其保健功能研究进展[J].中国农学通报,2016,32(10):176-181. [HONG J M, HE Y S, ZHENG Y Y, et al. Research progress of ingredients and health function of banana[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(10): 176-181.]
- [9] KUMAR K P S, BHOWMIK D, DURAIVEL S, et al. Traditional and medicinal uses of banana[J]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2012, 1(3): 2278-4136.
- [10] 李哲.超声波辅助提取香蕉皮多酚及其抗氧化性的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012. [LI Z. Ultrasonic-assisted extraction of total polyphenols from banana peels and the research of its oxidation resistance[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.]
- [11] 齐静.超声波辅助提取香蕉皮多酚及其抗氧化性的研究[D].武汉:武汉工业学院,2012. [QI J. Ultrasonic-assisted extraction and antioxidant activity of the polyphenol from banana peel[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2012.]
- [12] KAMEL N A, EL-MESSIEH S, SALEH N M. Chitosan/banana peel powder nanocomposites for wound dressing application: Preparation and characterization[J]. *Materials Science & Engineering C Materials for Biological Applications*, 2017, 72(mar.): 543.
- [13] GONZALEZ-MONTELONGO R, LOBO M G, GONZALEZ M. Antioxidant activity in banana peel extracts: Testing extraction conditions and related bioactive compounds[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1030-1039.
- [14] HANG T V, SCARLETT C J, QUAN V V. Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: A review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 40: 238-248.
- [15] 冯尚坤.香蕉皮中抗氧化物质的研究[J].食品研究与开发,2008(5):72-75. [FENG S K. Study on the antioxidant of banana peel[J]. *Food Research and Development*, 2008(5): 72-75.]
- [16] 赖长鸿,王忠合,王军,等.香蕉成熟度对香蕉粉中营养成分及功能特性的影响[J].食品科技,2016,41(7):92-96. [LAI C H, WANG Z H, WANG J, et al. Effect of maturities on nutritional components and functional properties of banana powder[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(7): 92-96.]
- [17] EKESA B, NABUUMA D, BLOMME G, et al. Provitamin a carotenoid content of unripe and ripe banana cultivars for potential adoption in eastern Africa[J]. *Journal of Food Composition & Analysis*, 2015, 43(Complete): 1-6.
- [18] 李健,杨昌鹏.蕉类果实催熟过程中多酚含量、多酚氧化酶和过氧化物酶活性变化研究[J].广东农业科学,2011,38(14):94-96. [LI J, YANG C P. Changes of polyphenol content, polyphenol oxidase activity and peroxidase activity in banana fruits during ripening[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(14): 94-96.]
- [19] 郝俊光,李芳杰,陈静,等.香蕉皮中酚类和类胡萝卜素的国外研究进展[J].食品与发酵工业,2019,45(12):265-271. [HAO J G, LI F J, CHEN J, et al. Oversea research process on phenolic compounds and carotenoids in banana peels[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(12): 265-271.]
- [20] KANAZAWA K, SAKAKIBARA H. High content of dopamine, a strong antioxidant, in cavendish banana[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2000, 48(3): 844-8.
- [21] ZHANG P, WHISTLER R L, BEMILLER J N, et al. Banana starch: Production, physicochemical properties, and digestibility-a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005.
- [22] 蒋欣梅,孙天宇,刘汉兵,等.不同种类老山芹总酚和总黄酮含量及抗氧化能力的初步研究[J].中国蔬菜,2018(9):24-28. [JIANG X M, SUN T Y, LIU H B, et al. Preliminary studies total phenols and total flavonoids contents and antioxidant activities in different kinds of heracleum moellendorffii hance[J]. *China Vegetables*, 2018(9): 24-28.]
- [23] 郑凤锦,陈赶林,蒙艳红,等.甘蔗汁发酵产物的抗氧化能力分析[J].南方农业学报,2015,46(3):475-479. [ZHENG F J, CHEN G L, MENG Y H, et al. Antioxidant ability of fermented

products from sugarcane juice[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(3): 475–479.]

[24] 高鹏钊, 苗红霞, 张建斌, 等. 香蕉整果实发育成熟过程中多酚物质的变化规律[J]. *热带农业科学*, 2016, 36(11): 61–65.

[GAO P Z, MIAO H X, ZHANG J B, et al. The regular of changes of polyphenols during fruit development in banana[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2016, 36(11): 61–65.]

[25] LIM Y, LIM T, TEE J J. Antioxidant properties of several tropical fruits: A comparative study[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(3): 1003–1008.

[26] SULAIMAN S F, YUSOFF A M, ELDEEN I M, et al. Correlation between total phenolic and mineral contents with antioxidant activity of eight Malaysian bananas(Mu-sa sp.)[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(1): 1–10.

[27] FALLER A L K, FIALHO E. Polyphenol content and antioxidant capacity in organic and conventional plant foods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2010, 23(6): 561–568.

[28] 黄素梅, 韦绍龙, 韦弟, 等. 香蕉废弃物提取物的总酚含量及其清除 DPPH 自由基能力[J]. *食品科技*, 2013, 38(8): 158–162.

[HUANG S M, WEI S L, WEI D, et al. Total phenol content and DPPH radical scavenging capacity of the extract from some banana waste[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(8): 158–162.]

[29] HANG T V, CHRISTOPHER J S, QUAN V V. Changes of

phytochemicals and antioxidant capacity of banana peel during the ripening process; with and without ethylene treatment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 253: 255–262.

[30] SASIPRIYA G, MARIA C L, SIDDHURAJU P. Influence of pressure cooking on antioxidant activity of wild (*Ensete superbum*) and commercial banana (*Musa paradisiaca* var. Monthan) unripe fruit and flower[J]. *J Food Sci Technol*, 2014, 51(10): 2517–2525.

[31] 王妙飞, 张道英, 魏玉凤, 等. 香蕉皮中总黄酮的体外抗氧化性[J]. *光谱实验室*, 2012, 29(6): 3677–3680. [WANG M F, ZHANG D Y, WEI Y F, et al. Antioxidant activities of total flavonoids from banana peel[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2012, 29(6): 3677–3680.]

[32] SIAH C W, TRINDER D, OLYNYK J K. Iron overload[J]. *Clinica Chimica Acta*, 2005, 358(1): 24–36.

[33] 陈洁, 胡晓赞. 蛋白水解物的抗氧化性研究与展望[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(9): 111–119. [CHEN J, HU X Y. Review on the antioxidant properties of protein hydrolysates[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2011, 11(9): 111–119.]

[34] 陈途, 陈明, 朱荣平, 等. 蛇莓的抗氧化活性研究[J]. *海峡药学*, 2021, 33(3): 53–56. [CHEN T, CHEN M, ZHU R P, et al. Study on antioxidant properties of *duchesnea indica focke*[J]. *Strait Pharmaceutical Journal*, 2021, 33(3): 53–56.]