

# 乳酸钙对仔姜低温贮藏期间品质影响的多变量分析

付云云, 蒋成, 张静, 王鹏霖, 姜林君, 廖丽, 孔燕, 闫小倩, 陈安均\*  
(四川农业大学食品学院, 四川雅安 625000)

**摘要:** 利用多变量分析方法探讨了不同质量浓度的乳酸钙处理对仔姜在低温贮藏期间品质变化的影响。单因素方差分析结果表明, 乳酸钙处理可以显著抑制仔姜的腐烂率、 $\Delta E^*$ 及硬度的降低, 有效地延缓了仔姜总酚、姜辣素、6-姜酚含量的降低。主成分分析及综合评价模型表明, 在贮藏过程中, 乳酸钙处理可以有效延缓果实品质的下降。相关性分析结果表明, 总酚含量与6-姜酚含量呈极显著正相关 ( $r=0.946, P<0.01$ ), 硬度与脆度呈显著正相关 ( $r=0.846, P<0.05$ ), 与多酚氧化酶活力呈显著负相关 ( $r=-0.883, P<0.05$ )。通径分析表明,  $\Delta E^*$ 、硬度、总酚含量与过氧化物酶活力对仔姜的腐烂率有较大的直接效应, 直接通径系数分别为1.347、0.345、-0.482、0.395, 其他指标均主要通过这4个指标产生较强的间接作用。

**关键词:** 仔姜; 乳酸钙; 贮藏品质; 多变量分析

## Multivariate Analysis of the Effect of Calcium Lactate on the Quality of Baby Ginger Rhizome during Low-Temperature Storage

FU Yunyun, JIANG Cheng, ZHANG Jing, WANG Penglin, JIANG Linjun, LIAO Li, KONG Yan, YAN Xiaoqian, CHEN Anjun\*  
(College of Food Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625000, China)

**Abstract:** In this study, the effects of treatment with different concentrations of calcium lactate on the quality of baby ginger rhizome were studied by multivariate analysis. The One-way analysis of variance (ANOVA) showed that calcium lactate treatment could significantly inhibit decay incidence and the decrease in color difference ( $\Delta E^*$  value) and hardness. It effectively delayed the decrease in total phenol, gingerol and 6-gingerol contents. Principal component analysis and the comprehensive evaluation model showed that calcium lactate treatment delayed the decline of fruit quality during storage. The correlation analysis indicated that total phenol content was significantly positively correlated with 6-gingerol content ( $r = 0.946, P < 0.01$ ), and hardness was positively correlated with brittleness ( $r = 0.846, P < 0.05$ ) and negatively correlated with polyphenol oxidase activity ( $r = -0.883, P < 0.05$ ). Path analysis showed that  $\Delta E^*$  value, hardness, total phenol content and peroxidase activity had a greater direct effect on decay incidence with path coefficients of 1.347, 0.345, -0.482 and 0.396, respectively. All other indicators had an indirect effect through these four indicators.

**Keywords:** baby ginger rhizome; calcium lactate; storage quality; multivariate analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190113-148

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2020)03-0165-06

引文格式:

付云云, 蒋成, 张静, 等. 乳酸钙对仔姜低温贮藏期间品质影响的多变量分析[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 165-170.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190113-148. <http://www.spkx.net.cn>

FU Yunyun, JIANG Cheng, ZHANG Jing, et al. Multivariate analysis of the effect of calcium lactate on the quality of baby ginger rhizome during low-temperature storage[J]. Food Science, 2020, 41(3): 165-170. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190113-148. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2019-01-13

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2017YFC0505106)

第一作者简介: 付云云(1994—)(ORCID: 0000-0002-8600-5704), 女, 硕士, 研究方向为农产品贮藏。

E-mail: 1985138628@qq.com

\*通信作者简介: 陈安均(1968—)(ORCID: 0000-0002-7716-5618), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品科学。

E-mail: anjunc003@163.com

姜 (*Zingiber officinale* Roscoe) 是世界范围内广泛种植的根茎类蔬菜及香辛调味料<sup>[1]</sup>。根据采收成熟度的不同又可分为鲜食的仔姜、作为调味品的老姜及作种的种姜<sup>[2]</sup>。仔姜由于外皮幼嫩、纤维素含量低、水分含量高这些原因导致其在贮藏过程中易发生失水、腐烂、遭受微生物侵染等<sup>[3]</sup>。近年来,钙处理在采后果蔬保鲜方面的应用研究取得了一些成果。如用钙处理草莓可减缓果实硬度和VC含量的降低,抑制微生物的繁殖<sup>[4]</sup>,降低冬枣果实的呼吸强度,推迟后熟,维持细胞壁、细胞膜结构与功能的稳定<sup>[5]</sup>,采后钙处理已成功地应用于减少苹果、桃、马铃薯等多种果蔬的腐烂<sup>[6]</sup>。钙可以直接抑制真菌孢子的萌发和生长,或者间接影响胞外酶的活力而降低病原引起的果实的腐烂,而且可以加固果实的细胞壁,增强果实对病原物侵染的抵抗力<sup>[7]</sup>;但将其应用于仔姜保鲜还鲜有报道。

目前,国内外已有利用生物统计方法探究果实品质与特征指标关系的报道。Voon等<sup>[8]</sup>应用主成分分析方法研究了榴莲在低温贮藏过程中挥发性成分的变化;Ehsani-Moghaddam等<sup>[9]</sup>运用通径分析法探讨了苹果贮藏后熟过程中的品质变化;何欣萌等<sup>[10]</sup>利用多变量分析方法探讨了4种减压条件对蓝莓果实品质的影响。本研究中影响仔姜果实品质的因素主要包括腐烂率、硬度、脆度等,这些影响因子之间的综合效应反映了果实的品质特征,然而目前鲜见多变量分析在仔姜采后贮藏期间品质变化中的应用。本研究主要运用单因素方差分析、主成分分析、相关性分析、通径分析4种方法,探讨3种不同质量浓度的乳酸钙处理对采后仔姜品质变化的影响,以期对仔姜贮藏保鲜技术提供一定的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

仔姜为白口姜,采自四川省乐山市五通桥区。

香草醛、6-姜酚、芸香叶甘、没食子酸(均为色谱纯)北京索莱宝科技有限公司;其他试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

DEBAC05697高效液相色谱仪 (high performance liquid chromatography, HPLC) 美国Agilent公司; ES1035A型分析天平 上海信衡电子有限公司; FL-803A臭氧发生器 深圳市飞立电器科技公司; SC-390/412保鲜柜 海尔股份有限公司; UV-1800PC分光光度计 上海美谱达仪器有限公司; DZKW-D-4恒温水浴锅 上海一恒科技有限责任公司; CS-100S色差仪 杭州彩普科技有限公司; TA.XT Plus质构仪 英国Stable Micro Systems公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 处理方法

挑选新鲜、无腐烂、大小和成熟度基本一致的仔姜,采用200 mg/m<sup>3</sup>臭氧杀菌处理20 min后,分别用0.6 (A组)、0.9 (B组)、1.2 g/100 mL (C组)的乳酸钙处理15 min,对照组(CK)用清水处理15 min,处理后自然风干,放于盛有相对湿度为85%~90%沙土的塑料盒内,15 ℃预冷12 h后,在(11±1) ℃下进行贮藏,每组处理均重复3次,每7 d取样一次。

#### 1.3.2 指标测定

##### 1.3.2.1 腐烂率的测定

采用观察法记录仔姜腐烂数和总数,腐烂率按公式(1)计算。

$$\text{腐烂率}/\% = \frac{\text{仔姜腐烂数}}{\text{仔姜总数}} \times 100 \quad (1)$$

##### 1.3.2.2 硬度和脆度的测定

将仔姜切成厚度均匀的姜块(2 cm×1 cm×1 cm),参考刘继<sup>[2]</sup>的方法使用质构仪测定硬度和脆度,探头直径为5 mm,刺入速率为1.8 mm/s,刺入深度0.4 mm,每次测定3次,取其平均值作为测定结果。

##### 1.3.2.3 色差值的测定

参考Huang Hua等<sup>[11]</sup>的方法使用色差仪测定仔姜L\*、a\*、b\*值。贮藏后与贮藏前的颜色变化用 $\Delta E^*$ 表示,按公式(2)计算。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (2)$$

式中:L<sub>0</sub>、a<sub>0</sub>、b<sub>0</sub>分别表示贮藏前果实的色泽值。

##### 1.3.2.4 总酚含量的测定

采用福林-酚法测定仔姜总酚的含量<sup>[12]</sup>。

##### 1.3.2.5 总黄酮含量的测定

参照李会端等<sup>[13]</sup>的方法测定总黄酮含量。

##### 1.3.2.6 姜辣素含量的测定

姜辣素含量的测定参考廖钦洪等<sup>[14]</sup>的方法,并略有改动。取经冷冻干燥粉碎后过150目筛的姜粉1 g,加入15 mL、体积分数72%的乙醇溶液浸提,55 ℃浸提1 h,过滤后得样品供试液,精确吸取样品供试液0.5 mL,以体积分数72%的乙醇溶液定容至10 mL,在278 nm波长处测定吸光度。以不同质量浓度的香草醛溶液绘制姜辣素测定的标准曲线。

##### 1.3.2.7 6-姜酚含量的测定

仔姜中6-姜酚的提取参考Yang Yanfang等<sup>[15]</sup>的方法,并略有修改,称取经冷冻干燥至恒质量的仔姜片,粉碎后,过150目筛,称取1.5 g仔姜粉,加入50 mL甲醇超声提取1 h后,6 000 r/min离心15 min,收集上清液,将残渣在超声提取一次,离心合并两次上清液,蒸发至干,加入10 mL甲醇复溶,过0.22 μm滤膜,滤液用来测定仔姜中6-姜酚的含量。

6-姜酚含量的测定参考王丽<sup>[16]</sup>和宁二娟<sup>[17]</sup>的方法,并略有改动。使用HPLC进行测定,色谱柱:ZORBAX Eclipse Plus C<sub>18</sub>(4.6 mm×250 mm, 5 μm)。流动相为体积分数0.1%甲酸水溶液(A)-乙腈(B),按表1进行梯度洗脱,流速1.0 mL/min,检测波长280 nm,柱温30 ℃,进样量10 μL。6-姜酚的含量通过标准曲线进行定量,6-姜酚含量以mg/g表示。

表1 流动相梯度洗脱程序  
Table 1 Gradient elution program of mobile phase

时间/min	流动相A 体积分数/%	流动相B 体积分数/%	流量/ (mL/min)
0	86	14	1.0
3.8	86	14	1.0
4.8	92	8	0.8
16	90	10	0.8
36	78	22	1.0
43	78	22	1.0
45	86	14	1.0

### 1.3.2.8 过氧化物酶和多酚氧化酶的测定

过氧化物酶(peroxidase, POD)、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)的测定参考曹建康等<sup>[18]</sup>的方法。以每克鲜质量果蔬样品粗酶提取液在470 nm波长处每10 s吸光度增加0.001时为1个POD活力单位(U);以每克鲜质量果蔬样品粗酶提取液在420 nm波长处每10 s吸光度增加0.001时为1个PPO活力单位(U)。

### 1.4 数据统计与分析

实验数据采用SPSS 20.0软件进行方差分析、主成分分析、相关性分析和通径分析,  $P < 0.05$ 为差异显著。采用Origin Pro 8.5软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 乳酸钙处理对仔姜贮藏期间品质的影响

如表2所示,对照组仔姜在贮藏初期硬度为27.38 N,作为根茎类蔬菜,仔姜在贮藏过程中硬度呈先上升后下降的趋势,与其他叶类蔬菜<sup>[19]</sup>不同。至贮藏末期硬度大小顺序为A>B>C>CK,且各实验组差异显著( $P < 0.05$ ),说明乳酸钙处理可以有效延缓仔姜贮藏期间硬度的降低。脆度也是仔姜贮藏过程中的一个重要感官指标,能反映仔姜的食用品质,仔姜脆度在贮藏过程中也呈现先升高后降低的现象,贮藏末期各实验组中A组的脆度最高,比对照组高12.17%。果实腐烂率也随贮藏时间的延长而增加,在贮藏末期,A、B、C3个处理组的腐烂率为对照组的66.68%、41.67%、58.33%,且各实验组差异显著( $P < 0.05$ )。仔姜贮藏期间 $\Delta E^*$ 值随贮藏时间的延长逐渐增加,贮藏末期 $\Delta E^*$ 大小顺序为C>CK>A>B。POD、PPO活力与果实的颜色密切相关,在贮藏期间

POD、PPO活力整体呈现先升高后降低的现象,CK组POD活力在第14天达到最高,且乳酸钙处理组POD活力始终高于CK组。PPO活力在7 d或14 d时达到最大,14 d后对照组POD活力显著低于乳酸钙处理组。

作为植物丰富的次生代谢产物黄酮与总酚,其含量与果实的成熟衰老过程密切相关<sup>[20]</sup>。由表2可知,随着贮藏时间的延长,总酚含量先升高后降低,总黄酮含量波动性上升。贮藏过程中二者含量的变化与外界逆境胁迫有关,当遭受外界胁迫时,二者均会被诱导产生来提高机体的抗氧化能力<sup>[21]</sup>。在14 d时,C组的总酚含量最高,说明此时期的C组果实抗氧化能力最高,品质较好。6-姜酚作为生姜中起主要活性作用的姜辣素<sup>[22]</sup>,其含量在贮藏过程中先升高后降低,有研究表明,生姜在贮藏过程中姜酚会脱水转化成一系列相应的姜脑类同系物<sup>[23]</sup>;在贮藏末期,各处理组6-姜酚含量依次为A>C>B>CK,且各处理组差异显著( $P < 0.05$ )。

表2 贮藏期仔姜各指标的测定结果  
Table 2 Quality indicators of baby ginger rhizome during storage

组别	贮藏 时间/d	腐烂 率/%	硬度/N	脆度/N	$\Delta E^*$	总酚含量/ (mg/g)	总黄酮含量/ (mg/g)	姜辣素含量/ (mg/g)	6-姜酚含量/ (mg/g)	POD 活力/U	PPO 活力/U
CK	0	0.00 <sup>a</sup>	27.38 <sup>cd</sup>	28.27 <sup>de</sup>	0.00 <sup>f</sup>	23.54 <sup>d</sup>	11.33 <sup>j</sup>	45.32 <sup>e</sup>	25.93 <sup>i</sup>	0.56 <sup>h</sup>	4.56 <sup>g</sup>
	7	4.76 <sup>b</sup>	29.43 <sup>bc</sup>	30.87 <sup>cd</sup>	6.72 <sup>g</sup>	27.36 <sup>ef</sup>	13.16 <sup>gh</sup>	37.80 <sup>fg</sup>	31.66 <sup>e</sup>	0.66 <sup>h</sup>	7.69 <sup>d</sup>
	14	14.29 <sup>c</sup>	29.44 <sup>bcd</sup>	30.53 <sup>cd</sup>	6.77 <sup>g</sup>	28.77 <sup>gh</sup>	9.76 <sup>h</sup>	36.92 <sup>fg</sup>	28.47 <sup>f</sup>	2.73 <sup>h</sup>	8.69 <sup>e</sup>
	21	19.05 <sup>d</sup>	22.36 <sup>cd</sup>	26.69 <sup>de</sup>	17.88 <sup>ef</sup>	25.58 <sup>g</sup>	13.00 <sup>h</sup>	34.52 <sup>fg</sup>	27.68 <sup>f</sup>	2.21 <sup>h</sup>	3.42 <sup>h</sup>
	28	33.33 <sup>e</sup>	27.25 <sup>cd</sup>	23.11 <sup>de</sup>	21.48 <sup>d</sup>	25.20 <sup>g</sup>	13.83 <sup>gh</sup>	37.99 <sup>fg</sup>	24.29 <sup>g</sup>	1.42 <sup>h</sup>	3.28 <sup>h</sup>
35	57.14 <sup>f</sup>	15.03 <sup>f</sup>	21.85 <sup>de</sup>	29.93 <sup>b</sup>	24.86 <sup>g</sup>	17.83 <sup>de</sup>	39.46 <sup>e</sup>	18.89 <sup>g</sup>	0.12 <sup>h</sup>	5.94 <sup>g</sup>	
A	7	0.00 <sup>a</sup>	30.02 <sup>b</sup>	31.68 <sup>bc</sup>	8.86 <sup>e</sup>	32.05 <sup>de</sup>	12.79 <sup>hi</sup>	34.22 <sup>g</sup>	31.03 <sup>d</sup>	1.85 <sup>h</sup>	4.39 <sup>h</sup>
	14	0.00 <sup>a</sup>	27.41 <sup>cd</sup>	31.01 <sup>bcd</sup>	5.33 <sup>h</sup>	32.56 <sup>de</sup>	13.97 <sup>def</sup>	41.66 <sup>d</sup>	30.87 <sup>e</sup>	3.04 <sup>d</sup>	4.42 <sup>h</sup>
	21	14.29 <sup>c</sup>	24.22 <sup>d</sup>	28.62 <sup>cd</sup>	12.09 <sup>b</sup>	32.73 <sup>cd</sup>	14.82 <sup>g</sup>	49.88 <sup>a</sup>	29.77 <sup>f</sup>	3.32 <sup>e</sup>	10.14 <sup>b</sup>
	28	23.81 <sup>d</sup>	27.25 <sup>d</sup>	32.03 <sup>bc</sup>	17.45 <sup>cd</sup>	31.20 <sup>ef</sup>	14.31 <sup>gh</sup>	39.87 <sup>e</sup>	29.48 <sup>f</sup>	2.61 <sup>h</sup>	3.11 <sup>h</sup>
	35	38.10 <sup>e</sup>	22.18 <sup>e</sup>	24.51 <sup>de</sup>	24.52 <sup>c</sup>	28.22 <sup>gh</sup>	13.75 <sup>gh</sup>	44.89 <sup>e</sup>	27.45 <sup>f</sup>	2.83 <sup>e</sup>	10.92 <sup>b</sup>
B	7	0.00 <sup>a</sup>	32.73 <sup>a</sup>	34.15 <sup>a</sup>	5.43 <sup>h</sup>	28.41 <sup>gh</sup>	15.05 <sup>bc</sup>	33.97 <sup>h</sup>	30.50 <sup>f</sup>	2.05 <sup>h</sup>	9.94 <sup>b</sup>
	14	0.00 <sup>a</sup>	24.73 <sup>e</sup>	27.03 <sup>gh</sup>	7.05 <sup>g</sup>	30.92 <sup>def</sup>	14.69 <sup>def</sup>	38.02 <sup>f</sup>	29.73 <sup>f</sup>	4.75 <sup>d</sup>	7.11 <sup>d</sup>
	21	0.00 <sup>a</sup>	19.86 <sup>f</sup>	24.58 <sup>hi</sup>	13.55 <sup>gh</sup>	31.01 <sup>def</sup>	15.41 <sup>ab</sup>	41.64 <sup>d</sup>	28.92 <sup>g</sup>	2.73 <sup>h</sup>	7.69 <sup>d</sup>
	28	14.29 <sup>c</sup>	22.08 <sup>g</sup>	21.04 <sup>h</sup>	20.57 <sup>cd</sup>	27.81 <sup>hi</sup>	14.36 <sup>de</sup>	45.32 <sup>e</sup>	24.47 <sup>g</sup>	1.80 <sup>h</sup>	4.69 <sup>h</sup>
	35	23.81 <sup>d</sup>	20.64 <sup>h</sup>	23.74 <sup>hi</sup>	21.65 <sup>cd</sup>	26.48 <sup>gh</sup>	15.11 <sup>cd</sup>	41.00 <sup>f</sup>	23.35 <sup>g</sup>	3.07 <sup>h</sup>	10.91 <sup>b</sup>
C	7	0.00 <sup>a</sup>	30.50 <sup>b</sup>	31.89 <sup>bc</sup>	5.45 <sup>h</sup>	32.77 <sup>fe</sup>	10.55 <sup>j</sup>	31.62 <sup>g</sup>	33.83 <sup>d</sup>	1.40 <sup>h</sup>	7.42 <sup>h</sup>
	14	0.00 <sup>a</sup>	27.64 <sup>cd</sup>	33.05 <sup>ab</sup>	3.67 <sup>i</sup>	37.26 <sup>c</sup>	14.58 <sup>ab</sup>	37.47 <sup>fg</sup>	33.01 <sup>b</sup>	3.84 <sup>b</sup>	6.75 <sup>f</sup>
	21	0.00 <sup>a</sup>	28.51 <sup>bcd</sup>	28.48 <sup>def</sup>	15.34 <sup>ef</sup>	34.30 <sup>b</sup>	13.67 <sup>def</sup>	33.14 <sup>k</sup>	31.72 <sup>e</sup>	3.25 <sup>b</sup>	5.14 <sup>h</sup>
	28	14.29 <sup>c</sup>	24.37 <sup>ef</sup>	25.24 <sup>ghi</sup>	19.83 <sup>de</sup>	34.12 <sup>bc</sup>	14.17 <sup>def</sup>	35.82 <sup>b</sup>	28.72 <sup>f</sup>	3.06 <sup>d</sup>	4.89 <sup>hi</sup>
	35	33.33 <sup>d</sup>	17.81 <sup>h</sup>	22.50 <sup>h</sup>	32.42 <sup>a</sup>	31.27 <sup>def</sup>	13.85 <sup>ef</sup>	48.17 <sup>b</sup>	26.83 <sup>g</sup>	2.22 <sup>h</sup>	4.47 <sup>h</sup>

注:同列肩标字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.2 仔姜贮藏期间各品质指标主成分分析及综合评价模型的建立

将不同处理、不同贮藏时间仔姜的各指标进行主成分分析,结果见表3。在所有的主成分构成中,CK、A、B组的仔姜信息主要集中在前3个主成分PC1、PC2、PC3,且各组前3个主成分的累积贡献率均超过90%,因此设定这3个主成分能够代表对CK、A、B组仔姜数据的信息特征。C组的仔姜信息主要集中在前两个主成分

PC1、PC2, 前两个主成分的累积贡献率大于85%。因此选择第一组成份(PC1)、第二组成分(PC2)及第三主成分(PC3)作为仔姜果实各指标的评价的综合指标。

表3 主成分的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率

Table 3 Eigenvalues, contribution and cumulative contribution to total variance for principal components

主成分	CK			A			B			C		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%									
1	5.59	55.88	55.88	4.83	48.32	48.32	4.29	42.89	42.89	5.49	54.95	54.95
2	2.52	25.16	81.04	3.63	36.30	84.62	3.60	35.97	78.86	3.15	31.46	86.41
3	1.01	10.12	91.16	1.06	10.62	95.24	1.49	14.90	93.76	0.77	7.71	94.12
4	0.61	6.09	97.25	0.40	4.02	99.26	0.40	4.02	97.78	0.51	5.13	99.25
5	0.27	2.75	100.00	0.07	0.74	100.00	0.22	2.22	100.00	0.08	0.75	100.00
6	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
7	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
8	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
9	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
10	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00

由于各组提取的PC1、PC2及PC3已经基本保留了所有指标的原有信息, 累积贡献率均超过85%且特征值均大于1, 因此可以用3个变量 $Y_1$ 、 $Y_2$ 和 $Y_3$ 代替原来的10个指标(其中 $X_1 \sim X_{10}$ 均为标准化后的变量), 则得到表4的线性组合。

表4 各组果实品质的综合特征向量

Table 4 Integrated eigenvectors for fruit quality of all groups

组别	因子1	因子2	因子3
CK	$Y_1 = -0.902X_1 + 0.887X_2 + 0.968X_3 - 0.896X_4 + 0.586X_5 - 0.893X_6 - 0.015X_7 + 0.913X_8 + 0.094X_9 + 0.513X_{10}$	$Y_2 = 0.363X_1 - 0.127X_2 + 0.02X_3 + 0.413X_4 + 0.758X_5 + 0.031X_6 - 0.887X_7 + 0.092X_8 + 0.824X_9 + 0.386X_{10}$	$Y_3 = 0.166X_1 - 0.154X_2 + 0.139X_3 - 0.039X_4 + 0.247X_5 + 0.282X_6 - 0.31X_7 - 0.144X_8 - 0.325X_9 + 0.76X_{10}$
A	$Y_1 = -0.856X_1 - 0.971X_2 - 0.749X_3 + 0.781X_4 + 0.068X_5 + 0.583X_6 + 0.643X_7 - 0.234X_8 + 0.621X_9 + 0.887X_{10}$	$Y_2 = -0.008X_1 + 0.199X_2 + 0.592X_3 + 0.268X_4 + 0.982X_5 + 0.774X_6 - 0.363X_7 + 0.946X_8 + 0.750X_9 - 0.122X_{10}$	$Y_3 = -0.489X_1 - 0.097X_2 - 0.013X_3 - 0.56X_4 + 0.131X_5 + 0.119X_6 - 0.619X_7 + 0.094X_8 + 0.164X_9 + 0.223X_{10}$
B	$Y_1 = -0.792X_1 + 0.795X_2 + 0.92X_3 - 0.763X_4 + 0.289X_5 - 0.155X_6 + 0.784X_7 + 0.913X_8 + 0.132X_9 + 0.224X_{10}$	$Y_2 = 0.281X_1 - 0.387X_2 - 0.185X_3 + 0.580X_4 + 0.795X_5 + 0.963X_6 - 0.525X_7 + 0.220X_8 - 0.818X_9 + 0.668X_{10}$	$Y_3 = 0.516X_1 + 0.356X_2 + 0.324X_3 - 0.143X_4 - 0.515X_5 + 0.056X_6 - 0.325X_7 - 0.246X_8 + 0.652X_{10}$
C	$Y_1 = -0.881X_1 + 0.937X_2 + 0.952X_3 - 0.772X_4 + 0.349X_5 - 0.155X_6 + 0.02X_7 + 0.191X_8 + 0.186X_9$	$Y_2 = -0.088X_1 - 0.009X_2 + 0.153X_3 + 0.315X_4 + 0.295X_5 - 0.099X_6 + 0.33X_7 + 0.081X_8 + 0.027X_9$	

注:  $X_1$  腐烂率;  $X_2$  硬度;  $X_3$  脆度;  $X_4$   $\Delta E^*$ ;  $X_5$  总酚含量;  $X_6$  总黄酮含量;  $X_7$  姜辣素含量;  $X_8$  6-姜酚含量;  $X_9$  POD活力;  $X_{10}$  PPO活力。

以各组的PC1、PC2和PC3对应的特征值占所提取的3个组成成分的总的特征值之和的比例( $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ )作为权重, 以 $Y_1$ 、 $Y_2$ 和 $Y_3$ 作为特征向量因子, 构建综合评价模型, 得到综合评价指标(即综合得分) $F = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2 + \alpha_3 Y_3$ ,  $F$ 值越大, 说明仔姜的综合品质越好; 由该公式及表2中的数据可以计算得出各组仔姜贮藏品质的综合得分, 结果见图1。各组仔姜的综合得分均随贮藏时间的延长而降低, 且乳酸钙处理组在仔姜贮藏期间综合得分一直为正值, 其中A组仔姜的综合得分在贮藏末期为最高, 说明处理A可以较好地保持仔姜的品质。各组仔姜的综合得分在14 d以后迅速下降, 对照组在35 d时综合得分已经小

于0, C组在贮藏28~35 d时仔姜品质综合得分下降迅速, 因此说明此时果实的品质已严重下降, 不再适用于贮藏。

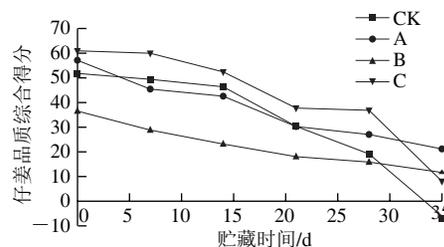


图1 仔姜贮藏品质综合评价

Fig. 1 Comprehensive quality evaluation of baby ginger rhizome during storage

2.3 仔姜贮藏期间各品质指标相关性分析结果

表5 品质指标间相关性分析

Table 5 Correlation analysis among different quality indexes

指标	腐烂率	硬度	脆度	$\Delta E^*$	总酚含量	总黄酮含量	姜辣素含量	6-姜酚含量	POD活力	PPO活力
腐烂率	1.000	-0.786	-0.582	0.946**	-0.014	0.483	0.290	-0.272	0.459	0.594
硬度		1.000	0.846*	-0.646	0.126	-0.429	-0.759	0.413	-0.483	-0.883*
脆度			1.000	-0.414	0.505	0.082	-0.625	0.677	-0.030	-0.824*
$\Delta E^*$				1.000	0.246	0.597	0.062	0.018	0.585	0.545
总酚含量					1.000	0.793	-0.255	0.946**	0.788	0.016
总黄酮含量						1.000	0.225	0.563	0.967**	0.374
姜辣素含量							1.000	-0.489	0.226	0.668
6-姜酚含量								1.000	0.575	-0.230
POD活力									1.000	0.463
PPO活力										1.000

注: \* 显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\* 极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

对仔姜的10个指标做相关性分析, 结果见表5。果实腐烂率与 $\Delta E^*$ 呈显著正相关( $r = 0.946$ ), 说明随着仔姜腐烂率提高, 果实色泽变化增加, 腐烂率与其他指标相关性均不显著。果实的硬度与脆度呈显著性正相关( $r = 0.846$ ,  $P < 0.05$ ), 硬度、脆度与PPO活力均呈显著性负相关, 相关系数分别为-0.883、-0.824, 说明果实硬度与果实脆度具有一致的变化趋势, 果实硬度与脆度的变化与PPO活性的变化趋势相反。同时, 仔姜贮藏过程中的总酚含量与6-姜酚含量呈极显著性正相关( $r = 0.946$ ), 与其他指标相关性均不显著。

2.4 通径分析结果

将仔姜的各项指标对腐烂率做线性回归分析, 得到线性回归方程为 $Y = -36.689 + 1.179X_1 + 0.981X_2 + 1.900X_3 - 1.564X_4 - 2.189X_5 + 0.798X_6 - 0.027X_7 + 4.485X_8 + 0.076X_9$ 。其中 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 分别代表硬度、脆度、 $\Delta E^*$ 、总酚含量、总黄酮含量、姜辣素含量、6-姜酚含量、POD活力、PPO活力。各个因变量及它们之间的相互作用与仔姜腐烂率的相关系数 $R = 0.961$ , 决定系数 $R^2 = 0.872$ , 线性回归方程 $F$ 假设检

验的结果为17.601,  $P < 0.01$ , 说明该方程具有极显著意义, 进一步作通径分析。

表6 以腐烂率为因变量的通径分析  
Table 6 Path analysis using decay incidence as dependent variable

因子	直接	→硬度	→脆度	→ $\Delta E^*$	→总酚含量	→总黄酮含量	→姜辣素含量	→6-姜酚含量	→POD活力	→PPO活力
硬度	0.345		0.233	-0.870	-0.061	0.118	-0.246	-0.002	-0.191	-0.013
脆度	0.276	0.292		-0.557	-0.244	-0.022	-0.202	-0.004	-0.012	-0.012
$\Delta E^*$	1.347	-0.223	-0.114		-0.119	-0.163	0.020	0.000	0.231	0.008
总酚含量	-0.482	0.043	0.140	0.332		-0.217	-0.083	-0.006	0.311	0.000
总黄酮含量	-0.274	-0.148	0.023	0.804	-0.380		0.073	-0.003	0.382	0.006
姜辣素含量	0.324	-0.262	-0.172	0.083	0.120	-0.062		0.003	0.089	0.010
6-姜酚含量	-0.006	0.142	0.187	0.025	-0.460	-0.154	-0.158		0.227	-0.003
POD活力	0.395	-0.167	-0.008	0.788	-0.380	-0.265	0.073	-0.003		0.007
PPO活力	-0.015	-0.305	-0.227	0.734	-0.010	-0.102	0.217	0.001	0.183	

由表6可知, 各指标对仔姜腐烂率的直接通径系数由大到小依次为 $\Delta E^*$ 、总酚含量、POD活力、硬度、姜辣素含量、脆度、总黄酮含量、PPO活力、6-姜酚含量。说明 $\Delta E^*$ 对腐烂率正直接作用最高, 且POD活力对腐烂率产生的间接作用是通过 $\Delta E^*$ 的直接作用产生。硬度与POD活力对腐烂率有正直接作用, 且脆度与 $\Delta E^*$ 对腐烂率产生的间接作用是通过硬度与POD活力的直接作用产生。总酚、总黄酮与6-姜酚对腐烂率有较大的负直接作用, 同时, PPO活力对腐烂率起负直接作用, 但作用效果较低。

### 3 讨论

钙是细胞壁的组成成分, 能够在细胞壁中的半乳糖醛酸和附近的果胶之间形成钙桥, 在细胞壁中起到桥梁作用<sup>[24]</sup>, 同时可以增强果实对病原菌的抵抗能力<sup>[25]</sup>。单因素方差分析结果表明, 乳酸钙处理可以显著降低仔姜低温贮藏中的腐烂率, 这与Luna-Guzmán等<sup>[26]</sup>研究经钙处理过的哈密瓜不易滋生微生物结果一致。同时, 贮藏35 d后经钙处理的仔姜硬度与对照组相比差异显著, 这与Aguayo等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。经乳酸钙处理后的POD、PPO活力均高于对照组, 而Barbagallo等<sup>[27]</sup>研究发现, 钙处理茄子后, 茄子在贮藏过程中PPO活力低于对照组。这种差异产生的原因还需进一步研究。

本研究使用主成分分析法对个品质指标进行了降维处理, 以特征值大于1为提取因子的标准, 以各自对应特征值的比例为权重建立果实综合评价模型。结果表明, 经乳酸钙处理后的仔姜在贮藏过程中F值明显高于对照组, 尽管如此, 但经乳酸钙处理14 d后的仔姜F值急剧下降, 说明乳酸钙处理前期对仔姜的品质保持效果显著, 但不利于长期贮藏。

由相关性分析结果可知, 腐烂率与 $\Delta E^*$ 值呈现正相关效应, 这说明贮藏期间仔姜腐烂率与仔姜颜色的变化

较为同步。通径分析是相关分析的继续, 在多元回归的基础上将相关系数加以分解, 通过直接通径系数、间接通径系数及总通径系数分别表示某一变量对因变量的作用效果<sup>[28]</sup>。腐烂率是果蔬贮藏的最为重要指标, 故本研究以腐烂率为因变量进行通径分析。结果表明,  $\Delta E^*$ 、硬度、总酚含量与POD活力对腐烂率的直接通径系数较大, 而其他因子主要通过这四者对腐烂率产生较强的间接作用。综上, 乳酸钙主要通过延缓仔姜贮藏期间硬度的下降、色差值的变化及POD活性的升高来延缓仔姜的腐烂, 从而延缓果实品质劣变。

### 参考文献:

- [1] WADIKAR D D, NANJAPPA C, PREMAVALLI K S, et al. Development of ginger based ready-to-eat appetizers by response surface methodology[J]. *Appetite*, 2010, 55(1): 76-83. DOI:10.1016/j.appet.2010.04.004.
- [2] 刘继. 仔姜采后保鲜技术及病害防治措施研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 1-2.
- [3] 随国良. 子姜贮藏保鲜技术的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 2-5.
- [4] 肖红梅, 朱士农, 王勇涛. 采后钙处理对草莓贮藏品质的影响[J]. *金陵科技学院学报*, 2004, 20(1): 51-54. DOI:10.3969/j.issn.1672-755X.2004.01.013.
- [5] 邢尚军, 刘方春, 杜振宇, 等. 采前钙处理对冬枣贮藏品质、钙形态及亚细胞分布的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(2): 235-239. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2009.02.054.
- [6] 饶景萍. 园艺产品贮藏学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 95.
- [7] KARABULUT O A, LURIE S, DROBY S. Evaluation of the use of sodium bicarbonate, potassium sorbate and yeast antagonists for decreasing postharvest decay of sweet cherries[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2001, 23(3): 233-236. DOI:10.1016/S0925-5214(01)00151-x.
- [8] VOON Y Y, HAMID N S A, RUSUL G, et al. Volatile flavour compounds and sensory properties of minimally processed durian (*Durio zibethinus* cv. D24) fruit during storage at 4 °C[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2007, 46(1): 76-85. DOI:10.1016/j.postharvbio.2007.04.004.
- [9] EHSANI-MOGHADDAM B, DEELL J. Correlation and path-coefficient analyses of ripening attributes and storage disorders in 'Ambrosia' and 'Fmnaire' apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 51(2): 168-173 DOI:10.1016/j.postharvbio.2008.07.006.
- [10] 何欣萌, 安琳, 陈玉娟, 等. 减压处理对蓝莓果实品质影响的多变量分析[J]. *食品科学技术学报*, 2014, 32(4): 28-34. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2014.04.006.
- [11] HUANG Hua, ZHU Qinjin, ZHANG Zhengke, et al. Effect of oxalic acid on antibrowning of banana (*Musa* spp. AAA group, cv. 'Brazil') fruit during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160: 208-212. DOI:10.1016/j.scienta.2013.05.041.
- [12] AMORIM H V, DOUGALL D K, SHARP W R. The effect of carbohydrate and nitrogen concentration on phenol synthesis in paul's scarlet rose cells grown in tissue culture[J]. *Physiologia Plantarum*, 1977, 39(1): 91-95. DOI:10.1111/j.1399-3054.1977.tb09291.x.
- [13] 李会端, 江岸, 余建中. 生姜总黄酮甲醇浸提工艺的响应面优化及提取液对羟自由基清除活性[J]. *北方园艺*, 2017, 41(23): 155-164. DOI:10.11937/bfyj.20172383.

- [14] 廖钦洪, 姜玉松, 李会合, 等. 乙醇提取生姜姜辣素的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 162-166. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.033.
- [15] YANG Yanfang, ZHANG Guijun, SUN Qiyu, et al. Simultaneous determination of 8 compounds in Gancao-Ganjiang-Tang by HPLC-DAD and analysis of the relations between compatibility, dosage, and contents of medicines[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2017, 2017: 4703632. DOI:10.1155/2017/4703632.
- [16] 王丽, 徐美霞, 王梅, 等. HPLC法测定母姜与子姜中的6-姜酚, 8-姜酚和10-姜酚[J]. 山东科学, 2013, 26(1): 12-15. DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.2013.01.004.
- [17] 宁二娟, 李建, 王韬, 等. HPLC法测定不同产地生姜中姜酚类成分的含量[J]. 河南科学, 2018, 36(4): 519-523. DOI:10.3969/j.issn.1004-3918.2018.04.010.
- [18] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 50-53.
- [19] ZENG F F, LUO Z S, XIE J W, et al. Gamma radiation control quality and lignification of bamboo shoots (*Phyllostachys praecox* f. *prevenalis*.) stored at low temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 102: 17-24. DOI:10.1016/j.postharvbio.2015.02.004.
- [20] 李艳杰, 郭玉曦, 丁树东, 等. 1-MCP和壳聚糖处理对香菇采后抗氧化能力的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(11): 38-44.
- [21] 蒋雯雯, 马淼, 郭艳, 等. 刺山柑多酚类物质含量及其抗氧化活性研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(3): 555-558. DOI:10.3969/j.issn.1000-4025.2012.03.018.
- [22] MIN-JUNG K, HWA-HYUN N, MYONG-SOO C. Conversion of 6-gingerol to 6-shogaol in ginger (*Zingiber officinale*) pulp and peel during subcritical water extraction[J]. Food Chemistry, 2019, 270: 149-155. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.078.
- [23] SUEKAWA M, ISHIGE A, YUASA K, et al. Pharmacological Studies on Ginger. I. pharmacological actions of pungent constituents, (6)-gingerol and (6)-shogaol[J]. Journal of Pharmacobio-Dynamics, 1984, 7(11): 836-848. DOI:10.1248/bpb1978.7.836.
- [24] ALANDES L, HERNANDO I, QUILES A, et al. Cell wall stability of fresh-cut Fuji apples treated with calcium lactate[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(9): 615-620. DOI:10.1111/j.1750-3841.2006.00180.x.
- [25] AGUAYO E, ESCALONA V H, ARTÉS F. Effect of hot water treatment and various calcium salts on quality of fresh-cut 'Amarillo' melon[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47(3): 397-406. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2007.08.001.
- [26] LUNA-GUZMÁN I, BARRETT D M. Comparison of calcium chloride and calcium lactate effectiveness in maintaining shelf stability and quality of fresh-cut cantaloupes[J]. Postharvest Biology & Technology, 2000, 19(1): 61-72.
- [27] BARBAGALLO R N, CHISARI M, CAPUTA G. Effects of calcium citrate and ascorbate as inhibitors of browning and softening in minimally processed 'Birgah' eggplants[J]. Postharvest Biology & Technology, 2012, 73(3): 107-114. DOI:10.1016/j.postharvbio.2012.06.006.
- [28] 敬艳辉, 邢留伟. 通径分析及其应用[J]. 统计教育, 2006(2): 24-26.