

## 5 种苹果微粉的理化品质与行为特征

薛玉洁<sup>1,2</sup>, 陈芹芹<sup>2</sup>, 毕金峰<sup>2</sup>, 周沫<sup>2</sup>, 宁喜斌<sup>1,\*</sup>, 王淑珍<sup>1,2</sup>

(1.上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2.中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 为了制备高品质的苹果纯粉, 给苹果制粉加工和新产品开发提供理论支持, 以国家苹果种质资源圃中常见的5个加工兼鲜食苹果品种(长富2号、寒富、黄元帅、国光、秦冠)为原料, 采用中短波红外干燥联合普通粉碎技术制备苹果微粉, 对苹果微粉的理化指标及加工过程中的行为特征进行测定与分析, 采用主成分分析法对苹果微粉的品质评价指标进行简化。结果显示, 在理化指标方面, 色泽上寒富苹果微粉的亮度显著高于其他品种苹果微粉, 秦冠苹果微粉的亮度最小; 长富2号微粉的总酚含量最高; 富士系苹果微粉的总糖含量最高。在行为特征方面, 长富2号和寒富在高应力条件下的黏结性较小且在输送过程中表现较好。对测定的20项指标依据主成分解释总变量和碎石图, 从中提取了反映原来变量90.38%信息的3个主成分, 综合各项指标得出富士系苹果是制备高品质苹果微粉的优选品种。

**关键词:** 苹果; 品种; 微粉; 品质; 流动性; 主成分分析

### Quality and Behavior Characteristics of Apple Micropowder Processed from Five Cultivars

XUE Yujie<sup>1,2</sup>, CHEN Qinqin<sup>2</sup>, BI Jinfeng<sup>2</sup>, ZHOU Mo<sup>2</sup>, NING Xibin<sup>1,\*</sup>, WANG Shuzhen<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To select the appropriate cultivar for processing pure apple micropowder, physicochemical and behavior characteristics of different pure apple micropowder processed from five apple cultivars including Changfu No. 2, Hanfu, Golden Delicious, Guoguang and Qinguan were evaluated. Apple micropowder was prepared by using short- and medium-wave infrared radiation drying combined with coarse grinding technology. All above parameters were further analyzed by principal component analysis (PCA). Among these cultivars, the lightness *L* value of Hanfu apple micropowder was the highest, whereas Qinguan apple micropowder presented the lowest *L* value. The contents of total phenol and total sugar in Fuji apple micropowder were the highest. The cohesiveness of Changfu No. 2 apple micropowder and Hanfu apple micropowder was lower than that of other cultivars under the condition of high stress. Furthermore, three principal factors were selected through PCA, which could account for 90.38% of the total variability. In summary, Fuji apple is the most appropriate cultivar for processing apple micropowder.

**Key words:** apple; cultivar; micropowder; quality; flowability; principal component analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201707018

中图分类号: TS255.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)07-0109-06

引文格式:

薛玉洁, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 5种苹果微粉的理化品质与行为特征[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 109-114. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201707018. <http://www.spkx.net.cn>

XUE Yujie, CHEN Qinqin, BI Jinfeng, et al. Quality and behavior characteristics of apple micropowder processed from five cultivars[J]. Food Science, 2017, 38(7): 109-114. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201707018. <http://www.spkx.net.cn>

我国是苹果生产大国, 据国家统计局统计, 2014年我国苹果产量达4 092.32万 t<sup>[1]</sup>, 约占世界总量的一半, 居

世界第一位。近年来, 随着城乡居民收入的增长及饮食需求结构的变化, 消费者对苹果加工产品形式的需求越

收稿日期: 2016-06-22

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0400704)

作者简介: 薛玉洁(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学。E-mail: yujiemis@163.com

\*通信作者: 宁喜斌(1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品安全、微生物学。E-mail: xbning@shou.edu.cn

来越多样化,对苹果加工产品的质量要求也越来越高<sup>[2]</sup>。不同的苹果品种适合加工的产品不同,同时不同品种的苹果其加工特性也有区别<sup>[3]</sup>。

苹果粉具有水分含量低、便于运输、加工用途广泛等优点,对新鲜果蔬进行干燥制粉,是近年来果蔬加工的新趋势,成为行业内关注热点之一<sup>[4]</sup>。许牡丹<sup>[5]</sup>、马超<sup>[6]</sup>等研究苹果纯粉的制备加工工艺,张雨等<sup>[7]</sup>研究提高苹果粉稳定性的适宜贮藏温度和添加剂,Jakubczyk等<sup>[8]</sup>研究苹果皮粉的水分吸附特性和玻璃化转变温度。国内外学者对苹果粉的研究多集中在苹果加工工艺、提高苹果粉溶解性、贮藏稳定性等,而对不同品种的苹果制备出的粉末品质,特别是加工过程中粉末的行为特征研究较少。

在果蔬粉加工过程中,果蔬粉的行为特征是实实现高效率制粉的重要指标。粉末通常被认为是颗粒的简单组合,事实上,粉末是以颗粒形式存在的固相、以颗粒间隙的空气形式存在的气相、以颗粒表面或者结构内部的水分形式存在的液相三相组成的复杂体。粉末的这种复杂结构表现出多种行为特征,其决定了粉末在加工过程以及最终应用中的表现。表征粉末行为特征的传统方法有卡尔指数<sup>[9]</sup>、休止角<sup>[10]</sup>、振实松装密度比较<sup>[11]</sup>、剪切盒分析等。这些方法的敏感性、区分性和数据重复性不理想,得到的参数并不系统。FT4多功能粉末测试仪是通过多种模块测定粉末的压缩百分比、剪切力和基本流动能等指标综合评价粉末的行为特征,实现对粉末行为的系统表征。

本研究以长富2号、寒富、黄元帅、国光和秦冠5个常见的加工兼鲜食苹果品种为原料,通过测定粉末的理化指标和加工过程中的行为特征指标包括压缩性、剪切性和流动性,利用主成分方法分析理化指标并联系粉末的行为特征分析不同品种苹果微粉的品质,明确适用于制粉的苹果品种,旨在为苹果制粉加工和新产品开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

新鲜的寒富、长富2号、黄元帅、国光、秦冠苹果 辽宁兴城中国果树研究所。实验前将物料贮存于(4.0±0.5)℃的冷库。

### 1.2 仪器与设备

中短波红外干燥机 圣泰科红外科技有限公司; CL 50 蔬菜水果处理机 法国Robot Coupe公司; CPA-125电子天平 德国Sartorius公司; Series 4TE水分活度仪 美国AquaLab公司; S3500激光粒度仪 美国Microtrac公司; CM700D分光测色计 日本柯尼卡美能达公司; 3K15离心机 德国Sigma公司; AUW220万分之一天平、紫外-可见分光光度计 日本岛津公司; FT4多功能粉质分析仪 英国Freeman Technology公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 苹果干燥前处理

取无伤病的新鲜苹果,用流动水清洗,去核器去核,切片机切成5 mm厚的苹果片,置于1%食盐水中浸泡5 min护色,沥干待干燥。

#### 1.3.2 苹果微粉制备工艺

采用中短波红外干燥技术对苹果片进行干燥,功率1 350 W,温度70℃,辐射距离80 mm,风速2.1 m/s。干燥210 min后,利用万能粉碎机对样品进行粉碎。粉碎3次,每次粉碎20 s,间隔时间5 min,避免仪器过热对物料产生影响,共粉碎60 s。

#### 1.3.3 苹果微粉理化指标的测定

苹果微粉的水分含量参照直接干燥法<sup>[12]</sup>进行测定;水分活度使用水分活度仪测定,将苹果微粉平铺满样品盒,高度为容器的2/3,放进仪器内进行测定;粒径利用激光粒度仪测定<sup>[13]</sup>;色泽采用分光测色计测定,记录各样品的明度指数(L值)、红绿指数(a值)和黄蓝指数(b值)。色差值 $\Delta E$ 通过公式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2} \quad (1)$$

式中:L、a和b表示干燥后样品的色泽值;L<sub>0</sub>、a<sub>0</sub>和b<sub>0</sub>表示鲜样色泽值。

总酚含量采用没食子酸比色法<sup>[14]</sup>测定;黄酮含量采用芦丁比色法<sup>[15]</sup>测定;总糖含量采用苯酚-硫酸法<sup>[16]</sup>测定;矿物质元素含量采用消解法<sup>[17]</sup>测定。

#### 1.3.4 苹果微粉的行为特征测试

利用FT4多功能粉质分析仪测定苹果微粉样品的行为特征参数。FT4多功能粉质分析仪以固定的“螺旋角”和“线速度”沿螺旋轨迹将螺旋桨叶片“切入”粉末,通过测定叶片所承受的阻力来表征粉末的各项行为特征。所有的测试都采用48 mm叶片以及50 mm直径容器。表征粉体行为特征的各项参数及定义见表1,所有参数均用转矩或力表示。

表1 表征粉末行为特征的各项参数及定义  
Table 1 Definition of different parameters for powder behavior

测试参数	定义
预处理松装密度 (conditioned bulk density, CBD)	预处理后的粉末松装密度
压缩系数 (compressibility, CPS)	对粉末施加正应力至m kPa时,粉末密度增加的百分比
最大主应力 (major principal stress, MPS)	在预固结正应力为m kPa条件下,根据稳态流动时的摩尔圆计算出的最大压应力
无约束屈服强度 (unconfined yield strength, UYS)	在预固结应力为m kPa条件下,最小主应力为0时作相切于屈服轨迹的摩尔圆上,所对应的最大主应力
堆积密度 (bulk density, BD)	粉末的堆积密度
基本流动能 (basic flowability energy, BFE)	在一个固定流动模式和流动速率下移动一个预处理和稳定的粉末样品所需要的能量。在此研究中“螺旋角”为-5°,叶片尖端“线速度”为100 mm/s,样品体积为160 mL,基本流动能由第7次测试的流动能量确定
稳定性指数 (stability index, SI)	流动能量对测试次数的变化指数。稳定性指数为第7次与第1次测试流动能量的比值
流动速率指数 (flow rate index, FRI)	流动能量对流动速率的变化指数。流动速率指数为第11次与第8次测试流动能量值的比值
特别流动能 (specific energy, SE)	以一种轻微剪切和上抬的模式移动一个预处理样品所需的能量再除以粉末的切分后质量

## 1.4 数据分析

本实验中采用SPSS 21.0软件进行数据分析处理；实验分析图采用Origin 8.0及Excel 2010软件绘制。

## 2 结果与分析

## 2.1 苹果微粉的理化指标

## 2.1.1 不同品种苹果微粉水分含量、水分活度和粒径分布

水分含量、水分活度、粒径 $D_{50}$ 是研究果蔬粉体的基本参数。不同品种苹果微粉的水分含量、水分活度和粒径 $D_{50}$ 见表2。

**表2 不同品种苹果微粉的水分含量、水分活度和粒径 $D_{50}$ 对比**  
**Table 2 Water content, water activity and PSD of apple micropowder from different cultivars**

品种	水分含量/%	水分活度	粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$
寒富	8.4±1.2 <sup>c</sup>	0.132±0.003 <sup>c</sup>	42.74±1.46 <sup>d</sup>
长富2号	9.4±0.6 <sup>bc</sup>	0.141±0.002 <sup>b</sup>	47.64±0.68 <sup>cd</sup>
黄元帅	7.0±0.2 <sup>d</sup>	0.130±0.003 <sup>c</sup>	61.74±1.63 <sup>a</sup>
国光	10.7±0.5 <sup>a</sup>	0.151±0.005 <sup>a</sup>	54.73±2.25 <sup>b</sup>
秦冠	10.3±0.4 <sup>ab</sup>	0.143±0.002 <sup>b</sup>	50.44±6.68 <sup>bc</sup>

注：同列肩标小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

不同品种苹果微粉的水分含量范围为7.0%~10.7%。在相同的干燥条件下，不同品种苹果微粉的水分含量不同。随着粉体中水分含量的增加，粉体颗粒之间的相互作用由于形成液桥而加强<sup>[18-19]</sup>。粉体中的液体容易包裹在颗粒表面，颗粒与颗粒之间形成液相桥接，降低颗粒的独立性，阻碍颗粒彼此自由移动。但在带静电的粉体中，水可作为导电介质，释放松装粉体中的静电，并让颗粒顺畅地流动。所以，必须确保松装粉体中包含足够的水，以最大程度降低静电效应，但水分含量又不能太高，过高致使颗粒间形成液相桥接影响粉末流动性。水分活度可反映食品体系中可参与生物化学反应的自由水的含量<sup>[20]</sup>，是确定贮藏期限的一个重要因素。总的来说，水分活度越小的产品越稳定。当水分活度低于0.60时，绝大多数微生物无法生长，食品体系中大多数的酶类物质的活性大幅度降低，氧化水解作用降低。不同品种苹果微粉的水分活度范围为0.130~0.151，此水分活度在微生物学安全范围内。不同品种苹果微粉的水分活度与水分含量表现一致。

苹果微粉的粒径分布用激光粒度仪测定。不同品种苹果经过相同制粉工艺处理之后，苹果微粉的粒径范围为42.74~61.74  $\mu\text{m}$ ，黄元帅苹果微粉的粒径最大，而寒富苹果微粉的粒径最小。粉体的粒径大小会影响粉体的流动性。粉体粒径太小导致粉末暴露太多的水合表面积，更容易吸湿，也可能由于表面的表达力，即范德华力、磁性和静电等<sup>[21]</sup>导致粉末结块，促使粉体的流动性变差。

## 2.1.2 不同品种苹果微粉的色泽

干燥产品的色泽属性直接影响产品被消费者接受的程度，是评估果蔬粉品质的重要指标。不同品种制得的苹果微粉 ( $L$ 、 $a$ 、 $b$ ) 和苹果鲜样 ( $L_0$ 、 $a_0$ 、 $b_0$ ) 的色泽参数见表3。与鲜样进行对比可以发现，干燥后产品的 $L$ 值均显著增加，这与前人的实验结果一致，即高温会导致产品颜色的改变<sup>[22-23]</sup>。色差值 ( $\Delta E$ ) 表示苹果粉体与鲜样的色泽差异，色差值 $\Delta E$ 越小，说明样品色泽与鲜样的越接近<sup>[24]</sup>。结果表明，寒富、黄元帅苹果微粉的 $\Delta E$ 值高于其余3种，说明这两种苹果微粉的色泽与鲜样差别较大。而寒富苹果微粉的 $L$ 值最大，秦冠苹果微粉的 $L$ 值最小，说明寒富苹果微粉颜色最亮，而秦冠苹果微粉的颜色最暗。

**表3 不同品种苹果微粉的色泽**  
**Table 3 Color parameters of apple micropowder from different cultivars**

品种	$L$	$L_0$	$a$	$a_0$	$b$	$b_0$	$\Delta E$
寒富	85.43±0.04 <sup>a</sup>	78.26±0.29 <sup>b</sup>	0.83±0.03 <sup>a</sup>	1.40±0.94 <sup>a</sup>	17.37±0.07 <sup>d</sup>	21.76±0.37 <sup>e</sup>	8.42±0.07 <sup>e</sup>
长富2号	82.78±0.02 <sup>b</sup>	78.01±0.22 <sup>b</sup>	0.69±0.03 <sup>b</sup>	1.14±0.41 <sup>b</sup>	20.2±0.25 <sup>b</sup>	24.74±1.08 <sup>a</sup>	6.60±0.17 <sup>c</sup>
黄元帅	84.82±0.03 <sup>b</sup>	77.83±1.14 <sup>b</sup>	-0.47±0.02 <sup>c</sup>	-0.07±0.79 <sup>b</sup>	20.65±0.22 <sup>c</sup>	23.07±0.45 <sup>d</sup>	7.40±0.06 <sup>d</sup>
国光	82.88±0.12 <sup>c</sup>	78.75±0.37 <sup>b</sup>	0.73±0.07 <sup>b</sup>	-1.98±0.13 <sup>c</sup>	18.19±0.08 <sup>c</sup>	16.13±0.36 <sup>d</sup>	5.35±0.03 <sup>d</sup>
秦冠	82.55±0.07 <sup>d</sup>	80.36±0.64 <sup>a</sup>	-0.50±0.02 <sup>c</sup>	-1.14±0.21 <sup>bc</sup>	17.20±0.09 <sup>d</sup>	14.87±0.48 <sup>e</sup>	3.26±0.10 <sup>f</sup>

## 2.1.3 不同品种苹果微粉的主要矿物质元素、总酚、黄酮和总糖含量

**表4 不同品种苹果微粉的矿物质、总酚、黄酮与总糖含量**  
**Table 4 Contents of mineral, phenols, flavonoids and sugar in apple micropowder from different cultivars**

品种	K含量/(mg/kg)	Ca含量/(mg/kg)	Na含量/(mg/kg)	Mg含量/(mg/kg)	总酚含量/(g/100g)	黄酮含量/(g/100g)	总糖含量/(g/100g)
寒富	8 318±80 <sup>a</sup>	307±3 <sup>bc</sup>	3 640±26 <sup>a</sup>	338±5 <sup>bc</sup>	0.38±0.01 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>c</sup>	6.72±4.46 <sup>e</sup>
长富2号	7 585±1 <sup>a</sup>	285±8 <sup>c</sup>	2 983±19 <sup>b</sup>	257±5 <sup>d</sup>	0.49±0.02 <sup>a</sup>	0.17±0.01 <sup>b</sup>	8.19±0.86 <sup>d</sup>
黄元帅	6 640±70 <sup>b</sup>	314±37 <sup>bc</sup>	3 856±37 <sup>a</sup>	294±38 <sup>cd</sup>	0.37±0.03 <sup>b</sup>	0.17±0.01 <sup>b</sup>	3.17±0.15 <sup>f</sup>
国光	6 669±5 <sup>b</sup>	344±6 <sup>b</sup>	3 013±26 <sup>b</sup>	343±2 <sup>b</sup>	0.48±0.07 <sup>a</sup>	0.25±0.00 <sup>a</sup>	3.61±1.21 <sup>f</sup>
秦冠	8 225±26 <sup>a</sup>	425±6 <sup>a</sup>	3 700±12 <sup>a</sup>	416±0 <sup>a</sup>	0.22±0.10 <sup>c</sup>	0.19±0.01 <sup>b</sup>	4.26±1.85 <sup>f</sup>

如表4所示，表中列出了4种常见的矿物质元素含量以及3种常见的化学指标。苹果微粉中K元素的含量显著高于其他3种，其中，寒富和秦冠苹果微粉中的K元素含量最高，且这两种苹果微粉的矿物质元素含量总体上高于其他3种苹果微粉。不同品种苹果微粉的总酚含量由高到低的顺序为：长富2号>国光>寒富>黄元帅>秦冠，黄酮含量由高到低的顺序为国光>秦冠>黄元帅、长富2号>寒富。长富2号微粉和国光微粉的总酚含量相近，而国光微粉的黄酮含量较高，秦冠微粉的总酚含量与黄酮含量比较接近。总酚和黄酮含量均有抗氧化作用，含量高可以提高苹果粉的整体品质，以该指标看，国光和富士系品种制备的苹果粉有较高的产品品质。不同品种苹果微粉的总糖含量由高到低的顺序为：长富2号>寒富>秦冠>国光>黄元帅。富士系的含糖量很高。粉末的化

学组成与加工方式影响其对外部因素的敏感度<sup>[25]</sup>。食品粉末颗粒间的相互吸引力（通常称为内聚力）依赖于它们的化学和生化性质<sup>[26]</sup>。内聚力会导致形成团块从而会影响粉体流动性等行为特征。

## 2.2 苹果微粉的行为特征

对于苹果微粉的各种应用，与其加工性能关系最大的行为特征各不相同<sup>[27-28]</sup>。影响粉末行为特征的因素有很多，单一的参数无法全面地表征粉末，因此需要测量多个特征。本实验采用压缩性、剪切性和基本流动能系统评价粉末的行为特征。

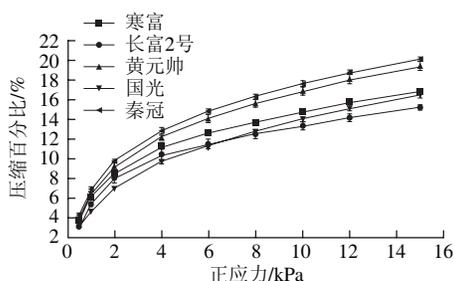


图1 不同正应力条件下样品的堆积密度压缩百分比

Fig. 1 Compressibility for bulk density under different normal stresses

图1是不同正应力下粉末堆积密度压缩百分比的变化曲线。粉末的压缩性是粉末的一种整体性质，用于研究运输、存储、加工（直接压片，碾压）等因素引起的密度变化。压缩性会对粉末的流动性质，尤其是在稍高的应力条件下的流动性质产生影响。压缩性高的粉末通常意味着粉末的黏结性高，容易发生固结。较高正应力条件下，5种粉末的压缩性明显不同，压缩性从高到低的排列次序是秦冠>黄元帅>寒富>国光>长富2号，较高的粉末压缩百分比对螺杆输送是不利的。

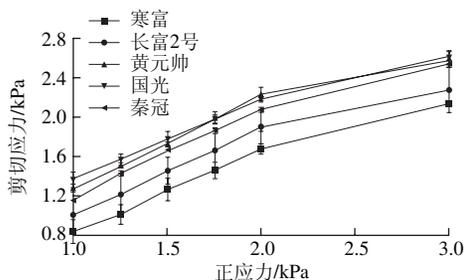


图2 不同正应力条件下样品的剪切强度

Fig. 2 Shear strength of apple micropowder under different normal stresses

本实验通过测量剪切应力表征粉末与粉末之间的摩擦。在相同的正应力条件下，剪切应力越大，粉末之间的摩擦力越大。由图2可知，较高正应力条件下，5种粉末样品的剪切强度排列次序为：国光>黄元帅>秦冠>长富2号>寒富，粉末颗粒的内聚强度和UYS排序与剪切强度完全一致，表示国光粉末的黏度最高，而寒富粉末

的最低。高的剪切强度值和高的粉末颗粒黏结性对料斗流动以及螺杆输送都是不利的。

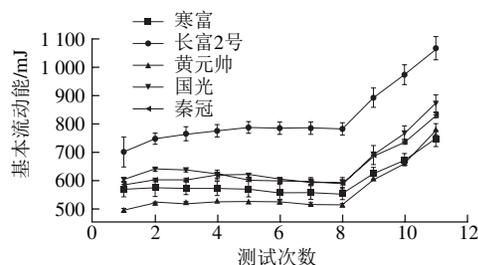


图3 不同测试次数样品的基本流动能

Fig. 3 Basic flow energy of apple micropowder at different flow rates

表5 测试行为特征时不同品种苹果微粉的主要实验数据

Table 5 Major experimental data for apple micropowder from different cultivars obtained in powder behavior test

品种	BFE/mJ	SI	FRI	SE/(mJ/g)	CBD1/(g/mL)	CBD2/(g/mL)	CPS/%	内聚强度/kPa	MPS/kPa	UYS/kPa	BD/(g/mL)
寒富	556	0.98	1.36	8.86	0.436	0.248	16.7	-0.07	5.43	0.48	0.297
长富2号	785	1.13	1.37	7.46	0.518	0.430	15.1	0.08	5.94	0.53	0.586
黄元帅	514	1.04	1.52	9.00	0.423	0.250	19.4	0.28	6.12	1.54	0.496
国光	594	0.98	1.47	7.30	0.456	0.363	16.4	0.47	6.17	2.25	0.530
秦冠	596	1.02	1.42	8.29	0.396	0.320	20.1	0.26	6.16	1.25	0.454

前8次测试的流动速率为均100 mm/s，第9、10、11次的流动速率分别为70、40、10 mm/s。某些粉末在加工过程中流动良好，而有些则会产生桥接，出现阻塞或者间歇性流动等问题。由图3可知，不同品种苹果微粉的基本流动能均随着测试时的流动速率的降低而升高。由表5可知，5种粉末的BFE值存在显著差异，黄元帅的BFE值最低，说明在一般情况下，黄元帅粉末易发生流动。寒富、黄元帅、国光和秦冠4种样品粉末可视为相对稳定（ $0.9 < SI < 1.1$ ），长富2号粉末则稳定性略差。FRI表示粉末的流动能随流动速率发生的变化。与多数粉末一样，这5种样品粉末的流动能都会随流动速率降低而增加。SE用来描述粉末处于松散堆积状态下的流动性质，比如低应力条件下粉末之间的摩擦或者颗粒机械咬合。SE数值越高，意味着颗粒间的机械咬合越强，5种苹果微粉的SE值由高到低的顺序为黄元帅>寒富>秦冠>长富2号>国光。

测试结果表明5种苹果粉末样品的流动性在不同环境和应力条件下都存在显著区别。多参数分析粉末的行为特征，粉末的一种性能表现良好，不意味着其他性能表现良好。长富2号压缩比低，有良好的存储、加工等性能，但它的基本流动能是最高的，不利于它的料斗流动。说明具有这些性质是彼此独立，互不相关的。

其中，秦冠、黄元帅具有较高的压缩性，所以该样品在高应力条件下的黏结性是最高的。黏性粉末在较低流速下流动时需要更大的流动能量，因为被粉末携入的

空气能够逃走，并形成一个抗流动性的硬壳。但黄元帅有较低的基本流动能，说明在低应力条件下黄元帅苹果微粉的流动性最好，这与黄元帅具有最低的含糖量，不容易吸湿结块有关。其他3个品种的苹果微粉的压缩性差别不大，而寒富苹果微粉样品的剪切强度、内聚强度和UYS是4个品种中明显最低的，说明寒富苹果微粉在输送过程中表现是较好的。

2.3 主成分分析

在解决实际问题 and 研究中，经常会对研究对象尽可能收集更多的信息，以期对问题有一个全面综合的认识，但大量信息反而成了分析和解决问题的障碍，为解决这一问题应采用主成分分析<sup>[29]</sup>。由于苹果微粉的品质与多种理化指标有关，因此，采用主成分分析法对苹果微粉品质进行评价。

对20项指标的测定数值进行主成分分析。本实验根据碎石图并以特征值大于1，且综合考虑方差贡献率确定最优的主成分数<sup>[30]</sup>。前3个主成分的特征值大于1且累计方差贡献率达90.38%，综合了20项参数的大部分信息。主成分1、主成分2和主成分3的方差贡献率分别达41.48%、30.63%和18.28%，而主成分4仅占9.62%（表6），这说明苹果品种的不同可以用主成分1、主成分2和主成分3解释。

表6 主成分分析解释总变量

Table 6 Total variance explained for PCA (principal component analysis)

指数	主成分			
	1	2	3	4
特征根	8.295	6.125	3.655	1.924
贡献率/%	41.476	30.627	18.276	9.621
累计贡献率/%	41.476	72.102	90.379	100.000

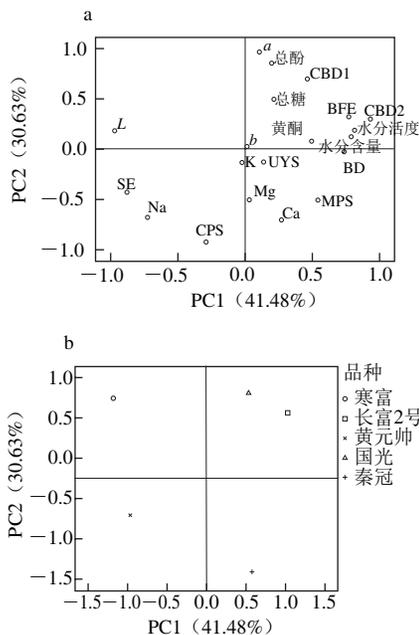


图4 主成分分析载荷图 (a) 和得分图 (b)

Fig. 4 PCA scores of PC1 and PC2 for 5 apple varieties

表7 主成分分析旋转后的成分载荷矩阵

Table 7 Rotated principal component matrix

指标	主成分			
	1	2	3	4
多酚含量	0.197	0.853	0.181	-0.449
黄酮含量	0.490	0.076	0.855	0.152
总糖含量	0.214	0.494	-0.836	-0.105
L	-0.971	0.177	-0.131	-0.095
a	0.106	0.969	-0.153	0.162
b	0.014	0.028	0.081	-0.996
K含量	-0.022	-0.132	-0.814	0.565
Ca含量	0.269	-0.704	0.203	0.626
Na含量	-0.724	-0.678	-0.100	0.082
Mg含量	0.029	-0.504	0.146	0.851
水分含量	0.787	0.122	0.161	0.584
水分活度	0.810	0.184	0.418	0.368
CBD1	0.461	0.696	-0.246	-0.493
CPS	-0.289	-0.923	0.205	0.147
MPS	0.541	-0.504	0.627	-0.245
UYS	0.142	-0.126	0.979	0.077
BD	0.733	-0.025	0.310	-0.605
BFE	0.769	0.319	-0.475	-0.284
SE	-0.877	-0.430	-0.212	-0.021
CBD2	0.931	0.297	-0.085	-0.192

由图4和表7可知，第1主成分主要综合了L值、Na含量、水分含量、水分活度、BD、BFE、SE、CBD2（基本流动能测试中所得）的信息，这些指标主要涵盖了苹果粉的初始稳定性指标，其中L值、Na含量、SE在第1主成分上呈负向分布，水分含量、水分活度、BD、BFE、CBD2呈正向分布，即在PC1坐标正向，PC1越大，水分含量、水分活度、BD、BFE、CBD2越大，L值、Na含量和SE则越小。第2主成分主要综合了CBD1（压缩性测试中所得）、CPS的信息，主要涵盖了加工输送过程中的指标，Ca含量和CPS在第2主成分呈负向分布。第3主成分主要综合了黄酮含量、总糖含量、K含量、MPS等理化指标，总糖含量、K含量在第3主成分呈负向分布。获得的结果表明，苹果粉的品质被初始粉末稳定性指标、输送性指标和理化指标3项有效区分。由图4a、b能够直观地看出各苹果品种与PC1和PC2的关系。国光和长富2号落在第一区间，其总酚、黄酮、总糖等含量丰富；寒富落在第二区间，与L值联系密切，且L值较大。通过主成分分析，综合其他分析结果得出，富士系苹果品种在色泽、营养成分等理化指标方面表现良好，是制备苹果微粉的适宜品种。

3 结论

本实验对比分析了5种苹果微粉的理化品质与行为特征指标，结果表明：在相同的加工方式下，对比苹果微粉的理化品质，5个品种苹果微粉的物理性质如色泽、粒径水平等有很大差别。长富2号的总酚和总糖含量最

高。不同的行为特征主导着不同的实际应用。对于各种应用以及工艺步骤,各项粉末属性的相关性不尽相同,且不存在普遍实用的单一粉末属性。长富2号和寒富在高应力条件下的黏结性较小且在输送过程中表现较好,黄元帅苹果微粉在低应力条件下流动性最好。综合各项指标分析及主成分分析,结果表明长富2号和寒富两个富士系品种苹果微粉的综合品质最佳,加工过程中流动输送表现良好,因此,确定寒富、长富2号富士系苹果是制备高品质苹果粉的适宜品种。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 苹果产量[EB/OL]. [2017-02-15]. <http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=中国%202014%20苹果>.
- [2] 白凤岐, 马艳莉, 李笑颜, 等. 6个品种苹果品质及加工适宜性研究[J]. 食品科技, 2014, 39(9): 66-71. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2014.09.015.
- [3] 田兰兰, 郭玉蓉, 段亮亮, 等. 6个苹果品种加工特性分析[J]. 食品工业科技, 2011, 32(4): 123-128. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.04.026.
- [4] 廖小军, 胡小松. 我国苹果生产、加工现状与发展对策[J]. 中国农业科技导报, 2002, 3(10): 13-16.
- [5] 许牡丹, 肖文丽, 刘红, 等. 纯天然苹果粉的制备工艺研究[J]. 食品科技, 2014, 39(9): 92-95. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2014.09.020.
- [6] 马超, 葛邦国, 刘光鹏, 等. 联合干燥结合超微粉碎制备苹果纯粉工艺研究[J]. 食品科技, 2014, 39(12): 115-120. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2014.12.025.
- [7] 张雨, 陈义伦, 马超, 等. 适宜贮藏温度和添加剂提高苹果粉稳定性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 323-331. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.22.040.
- [8] JAKUBCZYK E, OSTROWSKA-LIGEZA E, GONDEK E. Moisture sorption characteristics and glass transition temperature of apple puree powder[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(12): 2515-2523. DOI:10.1111/j.1365-2621.2010.02425.x.
- [9] 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉特性中的应用[J]. 中国粉体技术, 2000, 6(5): 33-36. DOI:10.3969/j.issn.1008-5548.2000.05.009.
- [10] 董玉秀, 宋珍鹏, 崔素娟. 对休止角测定方法的讨论[J]. 中国药科大学学报, 2008, 39(4): 317-320. DOI:10.3321/j.issn:1000-5048.2008.04.005.
- [11] 吴福玉. 粉体流动特性及其表征方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 22-27.
- [12] 卫生部. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-2.
- [13] ZHANG L H, XU H D, LI S F. Effects of micronization on properties of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 633-637. DOI:10.1016/j.ifset.2009.05.010.
- [14] CHAN E W C, LIM Y Y, WONG S K, et al. Effects of different drying methods on the antioxidant properties of leaves and tea of ginger species[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 166-172. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.07.090.
- [15] SUN L J, ZHANG J B, LU X Y, et al. Evaluation to the antioxidant activity of total flavonoids extract from persimmon (*Diospyros kaki* L.) leaves[J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(10): 2689-2696. DOI:10.1016/j.fct.2011.07.042.
- [16] SOHN K S, LEE J H, HA Y S. Clarification of mixed fruit and vegetable juices using enzyme treatment[J]. Food Engineering Progress, 2002, 6(3): 241-247.
- [17] 赵海燕, 郭波莉, 张波, 等. 小麦产地矿物元素指纹溯源技术研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3817-3823. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2010.18.016.
- [18] HARNBY N, HAWKINS A E, OPALINSKI I. Measurement of the adhesion force between individual particles with moisture present part 1: a review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1996, 74(6): 616-626.
- [19] ZOU Y, BRUSEWITZ G H. Flowability of uncompacted marigold powder as affected by moisture content[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(2): 165-171. DOI:10.1016/S0260-8774(02)00060-2.
- [20] FAZAEI M, EMAM-DJOMEH Z, ASHTARI A K, et al. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 90(4): 667-675. DOI:10.1016/j.fbp.2012.04.006.
- [21] FADDA S, CINCOTTI A, CONCAS A, et al. Modelling breakage and reagglomeration during fine dry grinding in ball milling devices[J]. Powder Technology, 2009, 194(3): 207-216. DOI:10.1016/j.powtec.2009.04.009.
- [22] LOZANO J E, IBARZ A. Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 31(3): 365-373. DOI:10.1016/S0260-8774(96)00079-9.
- [23] VEGA-GÁLVEZ A, di SCALA K, RODRÍGUEZ K, et al. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian)[J]. Food Chemistry, 2009, 117(4): 647-653. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.04.066.
- [24] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 预处理对压差闪蒸干燥丰水梨脆片品质及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 73-78. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201621013.
- [25] HEDEGAARD R V, SKIBSTED L H. 16-Shelf-life of food powders[J]. Handbook of Food Powders, 2013, 17(1): 409-434. DOI:10.1533/9780857098672.2.409.
- [26] OPALIŃSKI I, CHUTKOWSKI M, HASSANPOUR A. Rheology of moist food powders as affected by moisture content[J]. Powder Technology, 2016, 294: 315-322. DOI:10.1016/j.powtec.2016.02.049.
- [27] FREEMAN T, CLAYTON J, FU X, et al. The influence of powder flow properties on the filling of dies and capsules[C]// Asian Particle Technology Symposium. Singapore: National University of Singapore, 2012: 553-561.
- [28] FREEMAN R, FU X. Characterisation of powder bulk, dynamic flow and shear properties in relation to die filling[J]. Powder Metallurgy, 2008, 51(3): 196-201.
- [29] 公丽艳, 孟宪军, 刘乃侨, 等. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 276-285. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.13.034.
- [30] 邓健康, 刘璇, 吴昕焯, 等. 苹果等外果品质特性及其制汁适宜性分析[J]. 中国食品学报, 2016, 16(10): 204-212. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.10.028.