第41卷 第4期
2022年 7月

华 中 农 业 大 学 学 报
Journal of Huazhong Agricultural University

Vol.41 No.4
Jul. 2022,124～131

周丽玲,罗佳倩,常霞,等.酶解法制备柑橘皮渣膳食纤维的理化特性及抗氧化活性[J].华中农业大学学报,2022,41(4):124-131.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.04.016

# 酶解法制备柑橘皮渣膳食纤维的理化特性及抗氧化活性

周丽玲[1],罗佳倩[1],常霞[1],林军[1],黄帆[1],李高阳[1,2]

1.湖南大学研究生院隆平分院/果蔬贮藏加工与质量安全湖南省重点实验室/
湖南省果蔬加工与质量安全国际科技创新合作基地,长沙 410125;
2.湖南省农业科学院农产品加工研究所,长沙 410125

**摘要** 为探究不同柑橘膳食纤维的性能差异及提高柑橘加工副产物综合利用率,利用酶解法制备4种柑橘(脐橙、苹果柚、沃柑、柠檬)皮渣膳食纤维,采用扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱及X射线衍射对纤维形态结构进行表征,并测定理化性质及体外抗氧化活性,通过主成分分析评价不同柑橘纤维综合品质。结果显示,酶法制备的柑橘纤维性能存在品种差异,柠檬纤维总纤维含量(67.63±0.46)%最高,脐橙纤维组成比例最好,沃柑、脐橙纤维水合性能和体外抗氧化活性最强,苹果柚纤维在4种纤维中表现出最高表观黏度。综合评价从高到低排序为:脐橙纤维、沃柑纤维、苹果柚纤维、柠檬纤维。结果表明,酶法制备的4种柑橘膳食纤维均有较好生理活性,其中脐橙纤维综合品质最佳,作为食品添加剂有较广应用前景。

**关键词** 柑橘皮渣;膳食纤维;体外抗氧化活性;综合评价

**中图分类号** TS255.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)04-0124-08

柑橘是世界第一大类水果[1],我国是柑橘大国,种植面积及产量均居世界首位。柑橘果皮占柑橘全果质量的30%～50%,是柑橘加工过程中的主要副产物,每年在生产加工中产生的柑橘皮渣超过1 000万t,若不进行适当处理,会对环境、人类健康和经济造成负面影响,因此,加工副产物的高效利用已成为柑橘产业的重点发展方向[2]。

膳食纤维因其在调节肠道菌群[3]、控制血糖[4]等方面的生理功能而受到广泛关注,根据水溶性不同可将其分为水溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)。研究报道发现柑橘中SDF含量远高于豆渣、葡萄、苹果等,具有更好的功能特性[5-6]。Liu等[6]研究表明,柚子膳食纤维可改善低血糖,降低血脂水平,并对肠道菌群的丰富度和多样性具有积极影响。利用加工副产物提取柑橘纤维是一种更环保、更经济的方法,对于柑橘深加工及拓宽膳食纤维应用范围具有重要意义。

碱液浸提法因其提取率较高而常被用于膳食纤维提取[7],但易造成化学试剂残留,对环境不友好。相比于化学提取法,酶法制备膳食纤维通常生理活性更佳,且加工特性较好。Wang等[8]采用酶法、酸法及碱提3种方法提取猕猴桃膳食纤维,发现酶法制备的猕猴桃纤维结构更松散,IDF葡萄糖吸附能力最高,SDF油脂吸附能力最高。Ma等[5]对比分析酶法及碱液浸提法对紫萝卜纤维的影响,发现酶法制备SDF的产量显著高于碱法,持油力及胆固醇吸附能力也更高。

因此,本研究选用橙类(脐橙)、宽皮柑橘(沃柑)、柠檬、柚(苹果柚)4种产量较高的柑橘作为原料,通过酶解柑橘皮渣制备膳食纤维,并对其理化性质及功能进行综合评价,以期为拓宽柑橘纤维应用范围、提高柑橘副产物综合利用率提供理论基础。

收稿日期:2022-03-29
基金项目:湖南省重点研发计划项目(2021NK2014)
周丽玲,E-mail:zhoull203@hnu.edu.cn
通信作者:李高阳,E-mail:lgy7102@163.com

# 1　材料与方法

## 1.1　材料与试剂

脐橙（*Citrus sinensis*（L.）Osbeck），购于湖南省邵阳市新宁县；柠檬（*Citrus limon* cv Fino），购于四川省资阳市安岳县；沃柑（*Citrus reticulata*），购于湖南省永州市武鸣县；苹果柚（*Citrus maxima*‘Apple’），购于湖南省常德市澧县。果实均无损伤和腐烂。

将果实洗净后剥皮，皮渣于烘箱中 60 ℃干燥 48 h，粉碎后过孔径 0.178 mm 筛，将柑橘皮粉置于干燥器中保存备用。参照 Liu 等[6]的方法分别制备脐橙纤维（NODF）、苹果柚纤维（APDF）、沃柑纤维（ODF）及柠檬纤维（LDF）于 25 ℃的干燥器中备用。提取率按式（1）计算。

$$M=\frac{M_2}{M_1}\times 100\% \tag{1}$$

式（1）中，$M_1$为干燥后橘皮质量，g；$M_2$为干燥膳食纤维质量，g。

## 1.2　结构表征

采用扫描电镜仪（EVO LS10，德国 Carl Zeiss 公司）观察柑橘纤维微观结构；用红外光谱仪（Nicolet iS5，美国 Thermo fisher scientific 公司）、X 射线衍射仪（D8 Advance，德国 Bruker 公司）及热重分析仪（NETZSCH STA 449 F3/F5 Jupiter，德国耐驰公司）分析柑橘纤维结构特性并计算结晶度，具体方法参考文献[9]。

## 1.3　粉体性质测定

采用超纯水配制 0.5% 柑橘纤维悬浮液，用激光粒度分析仪（LS-POP VI，欧美克科技有限公司）测定粒径分布情况；用全自动色度分析仪（Color Quest XE，美国 Hunter Lab 公司）测定纤维色泽；参考 GB 5009.88—2014 测定总膳食纤维 TDF、不可溶性膳食纤维 IDF 及可溶性膳食纤维 SDF 含量；参考刘岩龙[10]的方法测定并计算纤维持水力（water holding capacity，WHC）、持油力（oil holding capacity，OHC）及溶胀性（swelling capacity，SC）；参考朱欣頔[11]的方法用流变仪（MCR302，奥地利 Anton Paar 公司）分析测定柑橘纤维表观黏度随剪切速率的变化规律以及在不同剪切速率下受到的剪切应力。

## 1.4　抗氧化活性测定

以 DPPH·和 $ABTS^+$ 自由基清除率、铁还原能力（FRAP）为指标对柑橘纤维体外抗氧化活性进行研究。

参照万仁口等[9]的方法分别制备质量浓度为 2.5、5、10、15、20 mg/mL 的纤维提取液并计算自由基清除率，测定方法略作修改：DPPH 溶液质量浓度为 0.039 mg/mL；ABTS 工作液配制方法如下：取 10 mL 7 mmol/L $ABTS^+$ 溶液，与 10 mL 2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$ 混匀后避光反应 12 h，使用前用无水乙醇稀释近 50 倍，至 734 nm 下检测吸光度小于 0.700 备用。

铁还原能力（FRAP）通常用于分析植物提取物的总抗氧化活性。FRAP 测定方法：取 0.1 mL 待测纤维，加入 3 mL 预热至 37 ℃的 FRAP 工作液，再加入 2 mL 超纯水，摇匀并于 37 ℃水浴反应 30 min。吸光度均采用紫外-可见分光光度计（UV-1800，苏州岛津仪器有限公司）测定。

## 1.5　数据处理

利用 SPSS 18.0 统计软件对数据进行单因素方差分析（Duncan’s 多重比较法，$P<0.05$），同时采用 Pearson 相关性分析及 KMO 检验，对测定指标进行主成分分析。用 Origin 2021 对数据进行绘图。

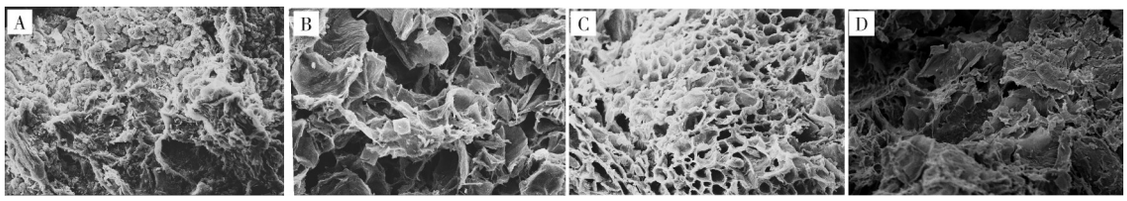
# 2　结果与分析

## 2.1　微观结构

图 1 为不同柑橘膳食纤维的扫描电镜图，NODF（图 1A）和 LDF（图 1D）排布较为紧密，且 NODF 呈团簇结构，表面粗糙不平，可以看到颗粒碎片。APDF（图 1B）结构较为疏松，表面存在孔隙。与其他 3 种纤维相比，ODF（图 1C）表面呈蜂窝状，具有更多孔状结构，孔隙度较高。膳食纤维的生理功能受微观结构影响，空间结构疏松的膳食纤维往往具有较大比表面积，可能会影响其对水、油等的吸附能力。酶处理会导致淀粉、蛋白质等降解，可能会在纤维表面留下多孔结构和起皱的表面，这些微观结构的变化有助于增大柑橘纤维表面积并增强其吸收水分、油脂的能力。

## 2.2　红外光谱

不同柑橘膳食纤维的红外光谱如图 2 所示。4 种柑橘纤维峰形相似，说明其化学组成基本相同。所有样品红外光谱均出现 3 400 $cm^{-1}$ 处的宽吸收峰，是由于纤维素和半纤维素 O—H 伸缩振动引起。2 928 $cm^{-1}$ 的峰值是来自膳食纤维中甲基和亚甲基上 C—H 键伸缩振动，表明存在典型多糖化合物结构。1 745 $cm^{-1}$ 处的特征吸收峰是半纤维素中羧酸 C=O 伸缩振动，是半纤维素特征吸收峰。1 647 $cm^{-1}$ 处的吸收峰是木质素的芳香族苯环，1 010 $cm^{-1}$ 处的峰是由于 C—O—C 键上 C—O 伸缩振动，是典型木聚糖吸收峰，表明柑橘纤维中含有木聚糖半纤维素。




A:脐橙纤维(NODF) Navel orange fiber; B:苹果柚纤维(APDF) Apple pomelo fiber; C:沃柑纤维(ODF) Orah fiber; D:柠檬纤维(LDF) Lemon fiber。下同 The same as below.

**图1 不同柑橘纤维的扫描电镜图(500×)**

Fig.1 The SEM photograph of different citrus dietary fiber

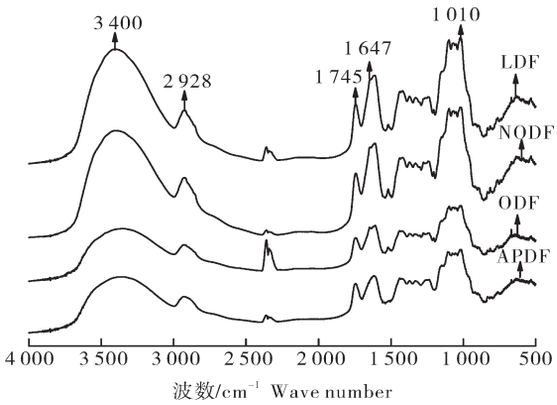



**图2 不同柑橘纤维的红外光谱图**

Fig.2 FT-IR spectra of different citrus dietary fiber

## 2.3 X射线衍射

如图3所示,不同柑橘纤维的特征衍射峰基本相同,说明其晶体构型较为相似。所有样品的主峰都出现在$2\theta$为22°附近,表明样品纤维均为纤维素Ⅰ晶体构型。结晶度的降低有助于改善柑橘纤维延展性,而结晶度增加可能会增强柑橘纤维的热稳定性。经计算,4种纤维的结晶度分别为:NODF(26.83%)、APDF(27.43%)、ODF(24.09%)、LDF(26.74%)。

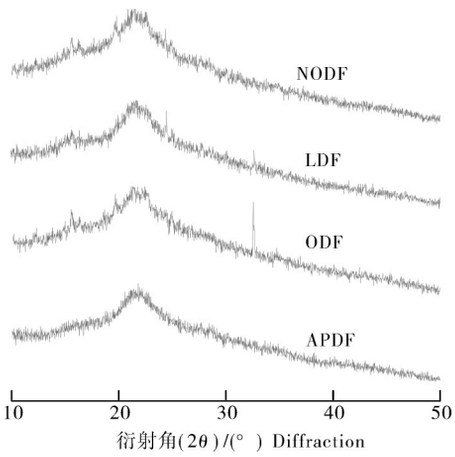



**图3 不同柑橘纤维的X射线衍射图**

Fig.3 XRD of different citrus dietary fiber

## 2.4 热稳定性分析

不同柑橘纤维热稳定性如图4所示。柑橘纤维热分解主要分为3个阶段,第一阶段(60~160 ℃)对应失水,是由于柑橘纤维分子内游离水和结晶水蒸发造成纤维样品质量下降;第二阶段(160~250 ℃)的降解主要是半纤维素和果胶热解聚,结晶区域破坏等,样品失重率分别为:NODF(28.71%)、APDF(28.73%)、ODF(31.07%)、LDF(26.06%),柑橘纤维中SDF主要由果胶及部分半纤维素组成,脐橙、沃柑及苹果柚纤维中SDF含量高于柠檬纤维(表1),可能是导致这3种纤维在此阶段失水较多的原因;第三阶段(>250 ℃)主要是由于一些木质素和复杂聚合物分解所致,4种柑橘纤维残留量分别为:NODF(24.19%)、APDF(24.40%)、ODF(24.34%)、LDF(25.12%)。

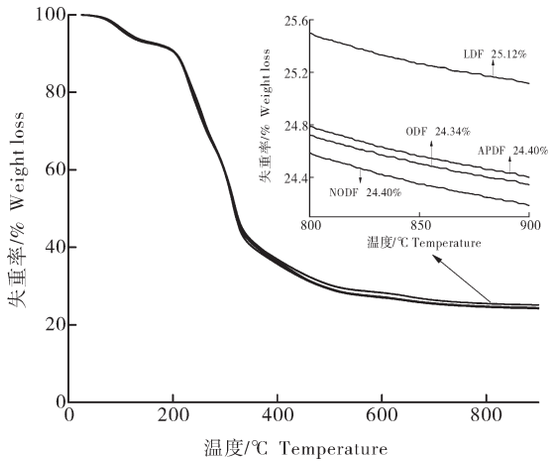



**图4 不同柑橘纤维的热重分析**

Fig.4 Thermogravimetric analysis of different citrus dietary fiber

## 2.5 粒径分布

不同柑橘膳食纤维的粒径分布如图5所示。苹果柚纤维在4种纤维中粒径最大,沃柑纤维粒径小于其他3种纤维。结晶度的降低可导致分子有序状态降低,使纤维形态减小,这可能是沃柑纤维颗粒尺寸

较小的原因。随着膳食纤维颗粒尺寸的减小，其理化性质和生理活性可能会得到改善。4种纤维的平均粒径为49.31～52.75 μm，表明酶解可作为一种低粒径膳食纤维提取的有效方法。

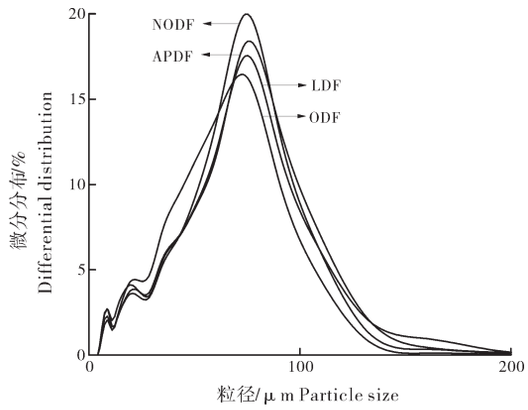



**图5　不同柑橘纤维的粒径分布**

Fig.5　Particle size distribution of different citrus dietary fiber

## 2.6　色泽及组成成分和功能性质

由表1可知，柠檬纤维$L^*$值在4种纤维中最高，呈现浅色色泽，有益于其在浅色食品中的应用。脐橙纤维$L^*$值显著低于其他3种纤维，根据SEM结果，脐橙膳食纤维存在团簇结构，可能使其比表面积增大，在制备过程中产生褐变，导致$L^*$值较低，$b^*$值较大。膳食纤维色泽对其在食品中的应用有直接影响。通过酶法制备的4种柑橘纤维都保持较相似的淡黄色，可能会限制其在浅色食品中作为配料的应用。

通过酶法制备的4种柑橘纤维主要成分均为IDF，含量达50%以上。柠檬总膳食纤维（TDF）及IDF含量均最高，分别为67.63%和56.60%。脐橙SDF含量高于其他3种柑橘纤维，为14.06%，且IDF与SDF比例较好（3.6∶1），可能对其生理活性具有一定促进作用。

沃柑纤维的持水力在4种膳食纤维中最高；脐橙、苹果柚、沃柑纤维的持油力差异不显著，柠檬纤维的略低；4种纤维的溶胀性为14.17～20.00 mL/g，脐橙纤维溶胀性最高，其余3种纤维差异不显著。

**表1　不同柑橘纤维的理化和功能性质**

**Table 1　Physicochemical and functional properties of different citrus fiber**

| 膳食纤维性质 DF properties | | NODF | APDF | ODF | LDF |
|---|---|---|---|---|---|
| 色泽 Color | $L^*$ | 73.96±0.00d | 77.00±0.19c | 77.31±0.01b | 82.16±0.01a |
| | $a^*$ | 3.15±0.01a | 1.64±0.01c | 2.10±0.02b | 0.27±0.02d |
| | $b^*$ | 18.98±0.02b | 15.22±0.05d | 19.14±0.04a | 15.44±0.03c |
| 组分 Components | 总膳食纤维/% TDF | 65.28±0.61ab | 63.75±0.91b | 64.94±0.42b | 67.63±0.46a |
| | 可溶性膳食纤维/% SDF | 14.06±0.01a | 12.01±1.02a | 12.56±1.44a | 11.03±0.83a |
| | 不可溶性膳食纤维/% IDF | 51.22±0.60b | 51.74±0.11b | 52.37±1.02b | 56.60±1.29a |
| 功能性质 Functional properties | 持水力WHC/(g/g) | 14.79±0.54a | 12.29±0.34b | 15.97±1.50a | 14.39±0.46a |
| | 持油力OHC/(g/g) | 12.05±0.35a | 11.94±0.77a | 12.04±0.07a | 9.55±0.84b |
| | 溶胀性SC/(mL/g) | 20.00±1.63a | 15.17±0.24b | 14.17±0.24b | 16.36±1.49b |

注：同行不同小写字母表示组间存在显著性差异（$P<0.05$）。Note：There are significant differences between different lowercase letters in the same row（$P<0.05$）.

## 2.7　流变特性

如图6A所示，不同柑橘纤维剪切应力与剪切速率之间呈现线性关系，其中粒径最大的APDF受到的剪切应力明显高于其他纤维，可能因为纤维粒径越大，越容易形成网络，导致更多颗粒相互作用，从而使其受到更大剪切应力。

不同柑橘纤维黏度随剪切速率变化规律如图6B所示。结果显示，在低速率下，柑橘纤维表观黏度随着剪切速率增加而显著降低，当剪切速率继续增加时，表观黏度趋于稳定，呈剪切稀化现象。相同剪切速率下，4种柑橘纤维中，APDF表观黏度最大，ODF及NODF表观黏度较小。结合粒径分布结果发现，平均粒径较小柑橘纤维黏度较高，可能是因为较小纤维颗粒尺寸可以提供较大比表面积和填充分数，使膳食纤维具有抗流动能力。同时，根据XRD分析结果，可能是由于APDF结晶度最高（27.43%），分子内排布较为有序，分子间相互作用力较大，导致表观黏度增大，也需要更大的力来打破其晶体结构，使相同剪切速率下，APDF受到的剪切应力较大。

## 2.8　抗氧化活性

不同柑橘膳食纤维抗氧化活性如图7所示，4种

柑橘纤维抗氧化能力均随其质量浓度的升高呈明显上升趋势，高纤维浓度对DPPH·、ABTS$^+$自由基均有较强清除能力，且具有较好的铁还原能力。由图7A、B可知，相同质量浓度下，不同柑橘纤维抗氧化活性具有显著性差异。NODF在4种柑橘纤维中表现出最高DPPH·、ABTS$^+$自由基清除力。

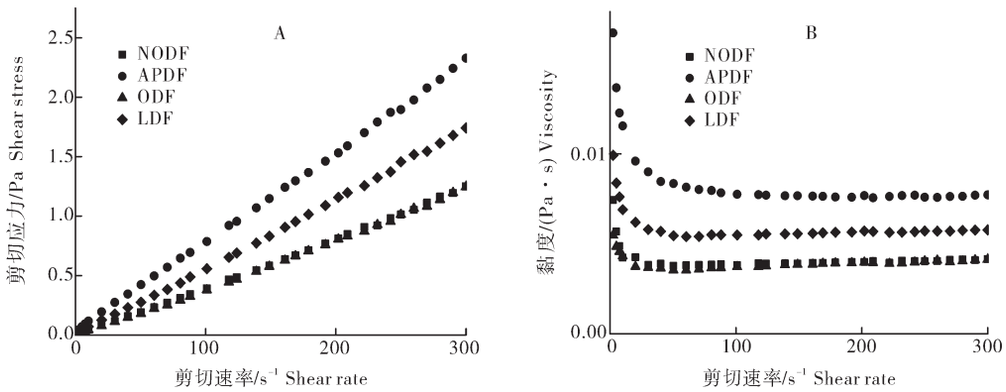
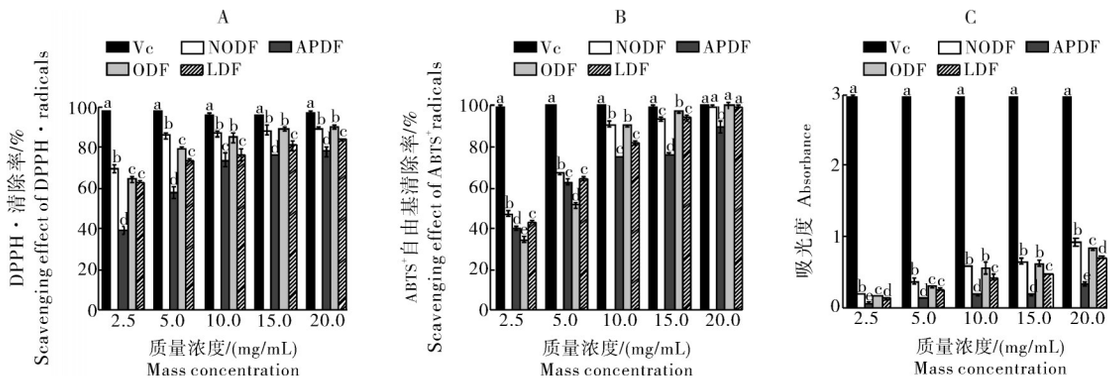



图6 不同柑橘纤维的剪切应力(A)和黏度(B)

Fig.6 Shear stress(A) and viscosity (B) of different citrus dietary fiber

如图7C所示，同浓度下，样品吸光度越高，表明还原力则越强，抗氧化能力也越高。可见Vc的铁还原能力显著高于柑橘纤维。4种柑橘纤维中，NODF、ODF铁还原能力显著高于APDF和LDF，与DPPH·及ABTS$^+$自由基清除能力变化规律一致。




A：DPPH·清除率 Scavenging effect of DPPH· radicals；B：ABTS$^+$自由基清除率 Scavenging effect of ABTS$^+$ radical；C：铁还原能力 Iron reduction capacity.

图7 不同柑橘纤维的抗氧化活性

Fig.7 Antioxidant activity of different citrus dietary fiber

## 2.9 相关性分析

将各指标测定值进行相关性分析，结果见表2。TDF与WHC、DPPH、ABTS、FRAP呈极显著正相关，与OHC及黏度呈极显著负相关，与SC呈显著正相关；IDF与OHC呈极显著负相关，与SC呈显著负相关；SDF与WHC、OHC、SC、DPPH、FRAP呈极显著正相关，说明膳食纤维中主要是可溶性膳食纤维SDF具有水合性能及抗氧化活性。粒径与WHC、OHC、DPPH、ABTS及FRAP呈极显著负相关，证明在一定粒度范围内，膳食纤维粒径越小，其持水性及持油性越高，抗氧化活性也越强。WHC、SC与DPPH、ABTS、FRAP呈极显著正相关，说明在一定范围内，膳食纤维水合性能对其抗氧化性能具有促进作用。黏度与粒径呈极显著正相关，即粒径较大的纤维黏度较高，可能是由于纤维颗粒度较大，加强了颗粒间相互作用，导致表观黏度增大。黏度对纤维体外抗氧化活性也具有显著影响。结果显示，黏度与DPPH、ABTS及FRAP呈极显著负相关。柑橘纤维粒径与亮度$L^*$呈显著正相关，与$a^*$及$b^*$呈极显著负相关，可能是因为粒径减小导致比表面积增大，

反射因数随之增大，导致纤维色泽变浅。DPPH 与 ABTS、FRAP 之间均呈极显著正相关，且相关系数大于0.7。结果表明，各表征指标间相关性较强，可采用主成分分析对不同柑橘纤维品质进行综合分析。

**表2　4种柑橘纤维表征指标的相关性系数矩阵**

**Table 2　Correction coefficient matrix of characterization index in 4 kinds of citrus dietary fiber**

| 项目 Item | TDF | IDF | SDF | WHC | OHC | SC | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | 粒径 Particle size | DPPH | ABTS | FRAP | 黏度 Viscosity |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TDF | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| IDF | 0.878** | 1 | | | | | | | | | | | | |
| SDF | −0.410** | −0.797** | 1 | | | | | | | | | | | |
| WHC | 0.356** | 0.075 | 0.303** | 1 | | | | | | | | | | |
| OHC | −0.876** | −0.957** | 0.717** | 0.014 | 1 | | | | | | | | | |
| SC | 0.199* | −0.188* | 0.611** | 0.042 | 0.036 | 1 | | | | | | | | |
| $L^*$ | 0.704** | 0.949** | −0.918** | −0.041 | −0.890** | −0.454** | 1 | | | | | | | |
| $a^*$ | −0.589** | −0.892** | 0.956** | 0.240** | 0.853** | 0.482** | −0.978** | 1 | | | | | | |
| $b^*$ | −0.167 | −0.516** | 0.769** | 0.785** | 0.567** | 0.275** | −0.633* | 0.776** | 1 | | | | | |
| 粒径 Particle size | −0.090 | 0.128 | −0.355** | −0.826** | −0.266** | 0.036 | 0.218* | −0.390** | −0.832** | 1 | | | | |
| DPPH | 0.293** | −0.056 | 0.474** | 0.799* | 0.113 | 0.402** | −0.267** | 0.438** | 0.777** | −0.751** | 1 | | | |
| ABTS | 0.277** | 0.097 | 0.164 | 0.350** | −0.088 | 0.348** | −0.064 | 0.144 | 0.276** | −0.248** | 0.712** | 1 | | |
| FRAP | 0.350** | −0.025 | 0.487** | 0.824** | 0.055 | 0.433** | −0.241** | 0.417** | 0.773** | −0.727** | 0.950** | 0.725** | 1 | |
| 黏度 Viscosity | −0.256** | 0.059 | −0.434** | −0.788** | −0.108 | −0.265** | 0.214* | −0.378** | −0.744** | 0.728** | −0.741** | −0.322** | −0.757** | 1 |

注：相关性为Pearson类型；*表示显著相关($P<0.05$)；**表示极显著相关($P<0.01$)。Note：The correlation is Pearson type；* indicates significant correlation ($P<0.05$)；** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

## 2.10　主成分分析

进行主成分分析前，采用KMO检验对所获数据进行适应性检验，经计算得知KMO=0.646，大于0.5，因此，可进行主成分分析。如表3所示，分析得到的3个因子特征值均大于1，累计方差贡献率达90.893%，可反映不同柑橘纤维绝大部分信息，因此提取前3个因子信息进行后续分析计算。

由表3可知，贡献率为49.083%的第1因子中荷载值较大的有TDF含量、SDF含量、IDF含量、$L^*$、$a^*$、$b^*$及OHC，主要反映纤维化学组成及色泽；第2因子贡献率为30.954%，其中荷载值较高且为正值的有WHC、FRAP、DPPH及$b^*$，粒径及黏度为负相关；贡献率为10.855%的第3因子中，SC及ABTS、FRAP荷载值均为正值且大于0.5，主要反映柑橘纤维抗氧化和水合性能。

以3个主成分分别对应的方差贡献率占累积方差贡献率的比例作权重建立综合评价模型：$F=0.540F_1+0.341F_2+0.119F_3$，综合评价结果如表4所示。脐橙纤维在第1、第3因子中的得分均最高，说明与其他品种相比，NODF在膳食纤维含量及组成、色泽方面具有优势。ODF在第2因子中得分最高，说

**表3　主成分的特征值、贡献率、累计贡献率及特征向量**

**Table 3　Principal components eigenvalues，contribution rate，accumulative contribution rate and eigenvector**

| 项目 Item | PC1 | PC2 | PC3 |
|---|---|---|---|
| TDF | −0.857 | 0.271 | 0.344 |
| IDF | −0.995 | 0.011 | 0.010 |
| SDF | 0.813 | 0.319 | 0.417 |
| WHC | −0.068 | 0.959 | 0.034 |
| OHC | 0.960 | 0.109 | −0.154 |
| SC | 0.225 | 0.013 | 0.913 |
| $L^*$ | −0.960 | −0.105 | −0.252 |
| $a^*$ | 0.908 | 0.302 | 0.281 |
| $b^*$ | 0.534 | 0.825 | 0.127 |
| 粒径 Particle size | −0.152 | −0.931 | 0.125 |
| DPPH | 0.065 | 0.845 | 0.460 |
| ABTS | −0.132 | 0.395 | 0.635 |
| FRAP | 0.029 | 0.845 | 0.500 |
| 黏度 Viscosity | −0.076 | −0.843 | −0.190 |
| 特征值 Eigenvalues | 6.872 | 4.334 | 1.520 |
| 方差贡献率/% Variance contribution rate | 49.083 | 30.954 | 10.855 |
| 累计贡献率/% Accumulative contribution rate | 49.083 | 80.037 | 90.893 |

明其在抗氧化性能方面具有最大优势。而LDF及APDF在第2因子中得分均较低，抗氧化活性较低。以不同因子贡献率为权重，根据不同品种各因子得分与相应权重乘积的累加计算得到纤维综合得分，排序为：脐橙纤维、沃柑纤维、苹果柚纤维、柠檬纤维，脐橙纤维综合品质最高，柠檬纤维品质较差。

**表4 4种柑橘纤维的得分及综合评价**

**Table 4 Score and comprehensive evaluation**

| 种类 Variety | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_{综}$ $F_{synthesis}$ | 排序 Sorting |
|---|---|---|---|---|---|
| NODF | 0.880 | 0.332 | 1.357 | 0.750 | 1 |
| APDF | 0.520 | −1.450 | −0.535 | −0.277 | 3 |
| ODF | 0.246 | 1.289 | −1.040 | 0.448 | 2 |
| LDF | −1.692 | −0.117 | 0.363 | −0.910 | 4 |

## 3 讨 论

柑橘皮渣是膳食纤维的主要来源之一，利用酶法制备脐橙、苹果柚、沃柑及柠檬皮渣膳食纤维，并分析比较其理化、结构及抗氧化活性差异。通过结构解析发现，4种柑橘纤维的红外光谱均呈现纤维素特征吸收峰，为纤维素Ⅰ晶体构型，表明酶处理未改变柑橘纤维晶型。

膳食纤维水合作用对肠道内营养物质消化吸收有直接影响，可增加饱腹感，起预防肥胖的作用，其生理功能与其表面结构密切相关。本研究表明，在一定粒度范围内，纤维粒径越小，其持水力、持油力越高，这与Huang等[12]的研究结果一致。4种柑橘纤维中，沃柑纤维WHC最高，可用作功能性食品配料，改善产品黏度和质地；根据SEM结果，沃柑纤维表面呈现蜂窝状，孔隙度较高，可能有助于吸收并保持更多水分子。酶法制备的4种柑橘纤维溶胀性均高于竹笋(5.11 mL/g)[13]、椰子(5.12 mL/g)[14]等的纤维，可能是经过酶解处理后，纤维表面淀粉残留物被去除，紧密的纤维表面被破坏形成多孔疏松的结构[15]，这些结构变化有助于提高纤维的吸附能力[16]，使柑橘纤维具有增加饱腹感的潜力，可作为一种功能食品添加剂用于预防或限制肥胖。此前的研究结果发现，SDF比IDF表现出更好抗氧化活性[9]，SDF与抗氧化能力之间存在正相关性[17]，测得脐橙纤维中SDF含量显著高于沃柑、苹果柚及柠檬纤维，可能对其抗氧化活性有增强作用；柑橘皮渣膳食纤维抗氧化活性与其浓度呈正相关，高纤维浓度具有较强的抗氧化活性；相关性分析结果表明，柑橘纤维SDF含量、WHC、SC与其抗氧化活性均呈极显著正相关。

研究表明柑橘皮渣可作为一种优质膳食纤维来源，为柑橘加工副产物综合利用提供新思路，提高柑橘加工链价值。本试验中制得4种柑橘纤维IDF占比均较大，未达到理想比例，仍需深入研究以改善SDF与IDF比例，进一步提升柑橘纤维的生理活性。

## 参考文献 References


[1] 祁春节，顾雨檬，曾彦.我国柑橘产业经济研究进展[J].华中农业大学学报，2021，40(1)：58-69.QI C J，GU Y M，ZENG Y. Progress of citrus industry economy in China[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(1)：58-69(in Chinese with English abstract).

[2] 范茜，范刚，任婧楠，等.脐橙皮渣的快速脱苦及其馅料制备[J].华中农业大学学报，2021，40(2)：213-221.FAN X，FAN G，REN J N，et al.Rapid debittering of navel orange peel residue and its filling preparation[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(2)：213-221 (in Chinese with English abstract).

[3] LIU S，JIA M Y，CHEN J J，et al.Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber[J].Food hydrocolloids，2019，93：284-292.

[4] WANG L W，BRENNAN M A，GUAN W Q，et al.Edible mushrooms dietary fibre and antioxidants：effects on glycaemic load manipulation and their correlations pre- and post-simulated *in vitro* digestion[J/OL]. Food chemistry，2021，351：129320[2022-03-29].https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129320.

[5] MA R，CHEN J N，ZHOU X J，et al.Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa* L.)[J/OL]. LWT-food science and technology，2021，145：111313[2022-03-29].https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111313.

[6] LIU H F，ZENG X Y，HUANG J Y，et al.Dietary fiber extracted from pomelo fruitlets promotes intestinal functions，both *in vitro* and *in vivo*[J/OL]. Carbohydrate polymers，2021，252：117186[2022-03-29].https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117186.

[7] CUI J F，ZHAO C Y，FENG L P，et al. Pectins from fruits：Relationships between extraction methods，structural characteristics，and functional properties[J]. Trends in food science & technology，2021，110：39-54.

[8] WANG K L，LI M，WANG Y X，et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)[J/OL]. Food hydrocolloids，2021，110：106162 [2022-03-29]. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106162.

[9] 万仁口，贺杨正，李功景，等.酶解制备竹笋可溶性膳食纤维及其抗氧化活性研究[J].中国食品学报，2021，21(3)：153-160.WAN R K，HE Y Z，LI G J，et al.Preparation and antioxidant activity of bamboo shoot soluble dietary fiber extracted by enzyme method [J].Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2021，21(3)：153-160 (in Chinese with English abstract).

[10] 刘岩龙.干燥和粉碎对脐橙膳食纤维性质的影响及膳食纤维的应用[D].武汉：华中农业大学，2016. LIU Y L. Effect of drying and grinding on properties of orange dietary fiber and its applica-

tion [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).

[11] 朱欣頔.基于高压均质的柑橘纤维理化、流变和显微特性研究[D].北京:中国农业大学,2018.ZHU X D.Study of physicochemical, rheological and microstructural properties of citrus fiber based on high-pressure homogenization treatment[D].Beijing:China Agricultural University,2018 (in Chinese with English abstract).

[12] HUANG J Y, LIAO J S, QI J R, et al. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel[J/OL]. Food hydrocolloids, 2021, 110: 106140[2022-03-29].https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106140.

[13] FANG D Y, WANG Q, CHEN C H, et al. Structural characteristics, physicochemical properties and prebiotic potential of modified dietary fibre from the basal part of bamboo shoot[J]. International journal of food science & technology, 2021, 56(2): 618-628.

[14] DU X J, WANG L, HUANG X, et al. Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour[J/OL]. LWT-food science and technology, 2021, 143: 111031 [2022-03-29]. https://doi. org/10.1016/j.lwt.2021.111031.

[15] ZHANG D L, JIANG B, LUO Y H, et al. Effects of ultrasonic and ozone pretreatment on the structural and functional properties of soluble dietary fiber from lemon peel[J/OL]. Journal of food process engineering, 2022, 45 (1): e13916 [2022-03-29]. https://doi.org/10.1111/jfpe.13916.

[16] FANG D Y, WANG Q, CHEN C H, et al. Structural characteristics, physicochemical properties and prebiotic potential of modified dietary fibre from the basal part of bamboo shoot[J]. International journal of food science & technology, 2021, 56(2): 618-628.

[17] SEZER D B, AHMED J, SUMNU G, et al. Green processing of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) pomace: process optimization for the modification of dietary fibers and property measurements[J]. Journal of food measurement and characterization, 2021, 15(4): 3015-3025.

# Physicochemical properties and antioxidant activity of dietary fiber from citrus peel pomace prepared by enzymatic hydrolysis

ZHOU Liling[1], LUO Jiaqian[1], CHANG Xia[1], LIN Jun[1], HUANG Fan[1], LI Gaoyang[1,2]

1. *Longping Branch Graduate School, Hunan University/Hunan Provincial Key Laboratory for Fruits and Vegetables Storage and Quality Safety/Hunan Province International Joint Lab on Fruits & Vegetables Processing, Quality and Safety, Changsha* 410125, *China*;

2. *Hunan Agricultural Products Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha* 410125, *China*

**Abstract**　Four kinds of dietary fibers from peel pomace of citrus including navel orange, apple pomelo, orah and lemon were prepared with enzymatic hydrolysis to study the performance differences of different citrus dietary fibers and improve the comprehensive utilization rate of by-products of citrus processing. The fiber morphology was characterized by scanning electron microscope, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction. The physicochemical properties and *in vitro* antioxidant activity were determined. The comprehensive qualities of different citrus fibers were evaluated by principal component analysis. The results showed that the properties of citrus fibers prepared with enzymatic hydrolysis were different among varieties. The total fiber content of lemon (67.63±0.46)% was the highest. The fiber composition ratio of navel orange is the best. The fiber of Orah and navel orange had the strongest hydration properties and in vitro antioxidant activity. The fiber of apple pomelo showed the highest apparent viscosity among the four kinds of fibers. The decreasing order of comprehensive evaluation is navel orange fiber, orah fiber, apple pomelo fiber and lemon fiber. It is indicated that four kinds of citrus dietary fibers prepared with enzymatic hydrolysis have good physiological activities. Among them, the comprehensive quality of navel orange fiber is the best, and it has a wide application prospect as a food additive. It will provide theoretical reference for citrus dietary fiber as a potential food additive resource and comprehensive utilization of citrus peel pomace.

**Keywords**　citrus peel pomace; dietary fiber; *in vitro* antioxidant activity; comprehensive evaluation

（责任编辑：赵琳琳）