

雷菁, 万智巍, 鞠民. 基于形态计量学和 CCA 分析的杂粮淀粉粒识别与鉴定 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 289–295. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020059

LEI Jing, WAN Zhiwei, JU Min. Recognition and Identification of Coarse Grain Starch Based on Morphometric and Canonical Correspondence Analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 289–295. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020059

· 分析检测 ·

基于形态计量学和 CCA 分析的杂粮 淀粉粒识别与鉴定

雷菁¹, 万智巍^{1,2,*}, 鞠民^{1,2}

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 江西南昌 330022;

2. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西南昌 330022)

摘要: 利用形态计量学参数指标, 基于相关多元统计分析方法, 对中国常见 8 种杂粮淀粉粒形态进行研究。结果表明, 不同类型的杂粮淀粉粒在整体形貌、粒径大小等方面具有一定的差异。高粱、薏米、小米和荞麦的淀粉粒为多边形, 粒径均值分别为 18.931、13.499、13.482 和 7.194 μm ; 豌豆、绿豆和扁豆淀粉粒为不规则椭圆形, 粒径均值为 24.008、23.895 和 21.001 μm ; 燕麦淀粉粒为半椭圆形, 粒径均值为 4.861 μm 。谷类杂粮的多边形淀粉粒轮廓曲线具有较为明显的折线和锯齿, 其小波谱闭合区表现较为复杂; 豆类淀粉粒轮廓线具有波动曲线特征, 其小波谱闭合区较为规律。典范对应分析 (CCA) 结果显示不同影响因子之间具有一定的差异性, 代表粒径均值、粒径标准差、Hu 不变矩 3、挤压面和 Hu 不变矩 1 等特征的因子箭头长度最长, 是影响淀粉粒形态差异的主要因素。CCA 分析可以为不同淀粉粒的鉴定提供影响因子选择标准。

关键词: 淀粉粒分析, 杂粮, 形态计量学, 典范对应分析

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)14-0289-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020059

Recognition and Identification of Coarse Grain Starch Based on Morphometric and Canonical Correspondence Analysis

LEI Jing¹, WAN Zhiwei^{1,2,*}, JU Min^{1,2}

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, Nanchang 330022, China)

Abstract: In this paper, morphometric parameters and multivariate statistical analysis had been used to study the starch grain morphology of 8 common coarse grain starch in China. The results showed that different types of coarse grain starch granules exhibit certain differences in overall morphology and particle size. The starch granules of sorghum, barley, millet and buckwheat were polygonal, with average diameters of 18.931, 13.499, 13.482 and 7.194 μm . Starch grains of pea, mung bean and lentil were irregularly elliptical, with average particle sizes of 24.008, 23.895 and 21.001 μm . Oat starch grains were semi-elliptical, with an average particle size of 4.861 μm . The contour curve of the polygonal starch grains of cereals had obvious broken lines and sawtooth, and the closed area of wavelet spectrum was more complicated. The contour line of bean starch grains had the characteristic of fluctuating curve, and the closed area of wavelet spectrum was more regular. The canonical correspondence analysis results showed that there were certain differences between different influencing factors. The factors representing the average particle size, standard deviation of particle size, Hu invariant moment 3, extrusion surface and Hu invariant moment 1 had the longest arrow length maybe the main factors leading to the difference of starch granule morphology. CCA could provide selection criteria of influencing factors for the identification of

收稿日期: 2021-02-07

基金项目: 国家自然科学基金 (41761045)。

作者简介: 雷菁 (1980-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 资源利用与可持续发展, E-mail: 28287106@qq.com。

* 通信作者: 万智巍 (1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 淀粉粒分析与环境变化, E-mail: wzw3392008@sina.com。

different starch granules.

Key words: starch grain analysis; coarse grain; morphometric; canonical correspondence analysis

中国是世界上主要的杂粮生产中心^[1],各地有着丰富的杂粮消费传统^[2]。由于杂粮具有独特的营养功能^[3-6],很多种类的杂粮被开发成为功能性食品和保健品^[7-9],如荞麦加工的降糖食品、燕麦加工的富含纤维食品等。这些杂粮深加工产品较好地满足了市场上有关降糖、降脂、减肥等消费需求^[10-11]。淀粉是杂粮中主要的营养成分,很多杂粮也是通过粉化处理后再进行食用^[12]。同时,杂粮粉也作为食品功能添加成分成为其他食品加工的原料^[13]。由于粉化后杂粮的来源较难直接判断,并且不同比例组成的杂粮粉也有着不同的质量要求。因此杂粮淀粉的鉴定在食品检验检疫、杂粮食品真伪等方面有着重要的作用^[14-15]。相关研究表明^[16-17],不同作物淀粉粒具有不同的形态特征,可以利用淀粉粒形态特征对淀粉粒种属来源进行鉴定^[18]。

近年来,随着形态计量学相关学科的发展^[19],很多学者开始利用这一技术进行动物形态鉴定^[20]、考古出土器物鉴定^[21]、人脸识别系统设计^[22]等领域的研究。形态计量学方法通过对物体的形态进行多指标量化处理,可以方便地与多元统计方法进行结合,提高了物体识别和鉴定的效率和准确度。也有相关学者利用形态计量学方法对相关主要粮食作物和经济类作物的淀粉粒进行了分析^[23],研究结果表明该方法可以较好的对淀粉粒形态进行量化鉴定。主成分分析的结果显示^[24-25],形态计量学方法所得到的主要形态参数可以较好的反映不同作物淀粉粒之间的差异,为淀粉粒的量化鉴定提供了依据。因此,本研究利用形态计量学方法对我国主要的杂粮品种,如高粱、小米和豆类等进行形态分析,获得这些杂粮的淀粉粒形态量化特征。同时,结合多元统计分析中常用的典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)方法对杂粮淀粉粒形态进行识别和鉴定。研究可以为今后的杂粮淀粉品质检测和不同淀粉来源鉴定等提供基础数据和测试方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

高粱、小米、荞麦、燕麦和薏米 取自北京市首航超市所出售的散装粮食;绿豆、豌豆和扁豆 取自南昌市深圳农贸场所出售的散装粮食。

Nikon Eclipse 50iPOL 显微镜 日本尼康;离心机(LXJ-II-B) 上海飞鸽;IKA MS3 振荡器 德国艾卡。

1.2 样品分析方法

杂粮样品的淀粉粒处理和提取过程参考文献^[24]中的方法。淀粉粒照片通过 Nikon Eclipse 50iPOL 显微镜和 MicroShot v1.2 图像处理软件获

取,每种杂粮的淀粉粒拍照个数参考文献^[26]中的标准,在显微镜下依据不同视野内所包括的淀粉粒数量,逐一进行选取和拍照测量。每种杂粮的淀粉粒选取个数为30粒,如一个视野中数量不够则进行多次拍照以保证数量。

1.3 形态计量指标

形态计量指标按照文献^[26-28]中的标准,主要选取粒径均值、粒径标准差、盒维数、轮廓线均值、轮廓线标准差、层纹、凹坑、挤压面、裂隙、脐点、小波谱、Hu 不变矩(Hu1~Hu7)等,指标的计算使用 Geomorph 软件^[29]和 Matlab 2012a 软件进行处理。粒径值通过显微镜测量获得,一般情况下可以直接通过显微镜目镜中的标尺进行数据读取;盒维数是一种通过不同尺度正方形网格所定义的曲线分形维数,可以用来反映曲线的分形几何特征,该数据通过 Matlab 软件中的 Sandbox 软件包进行求取;轮廓线均值、轮廓线标准差等通过 Geomorph 软件获得,用以表示轮廓线的相对变化程度;层纹、凹坑、挤压面、裂隙、脐点等指标表示淀粉粒的表面基本形貌,属于名义变量,如淀粉具有这一特征则记为1、不具备则记为0;小波谱指标为轮廓曲线经过小波分析转换所得的二维图谱,具有类似于波峰和波谷特征,以形态上存在的闭合曲线个数进行定义,小波谱值的计算通过 Matlab 软件中的 Wavelet Toolbox 工具箱进行求取;Hu 不变矩是图像数字化的统计特征,区域的矩可以根据区域范围内的点的位置进行计算,用以反映整体图像的特征^[30],Hu 系列指标通过 Matlab 软件中的 Hu1-7 软件包进行求取。

1.4 典范对应分析(CCA)

典范对应分析(CCA)是多元统计分析的一种,可以对样本及其环境因子进行综合分析,了解不同影响因子下的样本排序,以及不同影响因子之间的相互关系。本次研究使用 VEGAN 软件包^[31]中的 CCA 函数进行分析。计算过程中所使用的参数为粒径均值、粒径标准差、盒维数、轮廓线均值、轮廓线标准差、层纹、凹坑、挤压面、裂隙、脐点、小波谱、Hu1-7 等共计18类参数。

1.5 数据处理

淀粉粒形态计量指标的获取与数据处理过程参照图1进行,主要包括二值化、轮廓提取、极坐标处理、外形轮廓曲线生成和小波谱分析等步骤,最终结合其他观察指标和 Matlab 2012a 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 基本几何形态

本次8种杂粮淀粉粒提取结果显示(图2),不同类型的杂粮淀粉粒在整体形貌、粒径大小等方面具

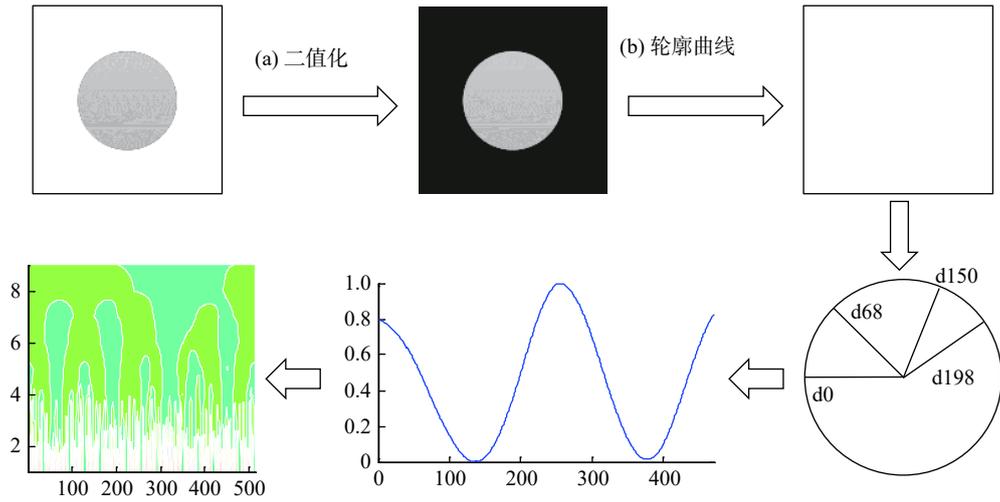


图 1 淀粉粒形态计量与数据处理流程图

Fig.1 Flow chart of starch grain morphometric data processing

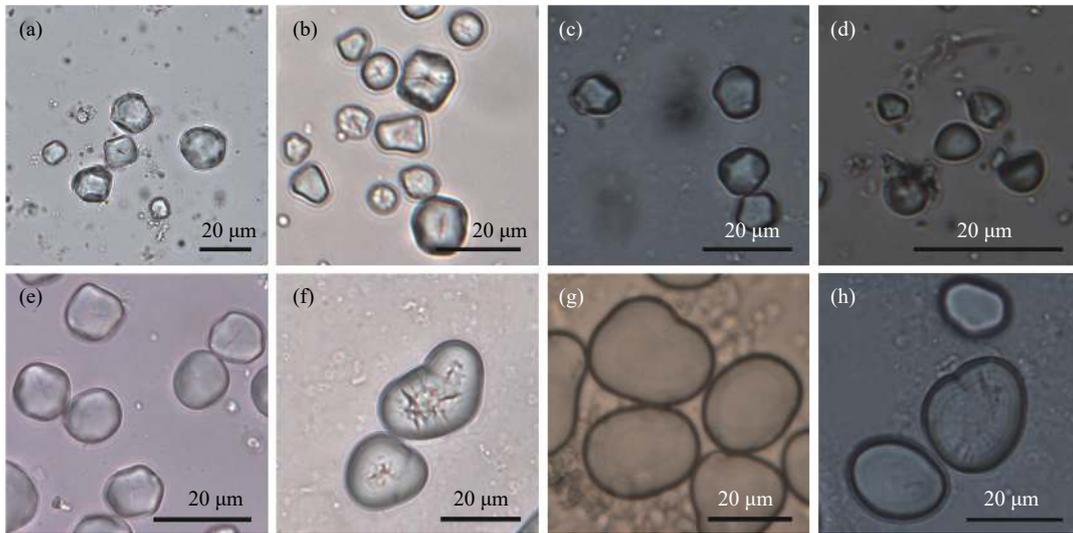


图 2 8 种杂粮的淀粉粒形态图谱

Fig.2 Morphological map of starch grains of 8 kinds of coarse grain

注: (a) 高粱, (b) 小米, (c) 荞麦, (d) 燕麦, (e) 薏米, (f) 绿豆, (g) 豌豆, (h) 扁豆。

有一定的差异。高粱、小米、荞麦和薏米的淀粉粒具有较为明显的多边形特征,在其淀粉粒周边存在部分挤压面。燕麦的淀粉除部分较小的瞬时淀粉外,多具有半椭圆形特征,并具有较为明显的脐点。绿豆、豌豆和扁豆淀粉粒在整体形貌上呈不规则椭圆形,并具有层纹和裂隙。在淀粉粒粒径方面(图 3),豆类植物的粒径较大,其中豌豆最大,粒径均值为 24.008 μm;绿豆粒径均值为 23.895 μm;扁豆粒径均值为 21.001 μm。高粱、薏米和小米的淀粉粒平均粒径较为接近,分别为 18.931、13.499 和 13.482 μm。荞麦和燕麦的淀粉粒平均粒径较小,分别为 7.194 和 4.861 μm。相关研究表明^[32]不同植物由于基因和生长环境的差异,其淀粉粒具有不同的形态。同时,由于不同植物形成淀粉粒的储存器官细胞结构不同,导致具有不同的粒径。由于本研究主要从形态学角度对不同杂粮淀粉粒进行分析,因此不涉及淀粉粒形态与淀粉性质之间的关系。

2.2 外形轮廓量化

淀粉粒外形轮廓曲线量化结果显示(图 4),不同杂粮淀粉粒外形轮廓曲线差异较大。整体而言,高粱、小米、荞麦和薏米等多边形淀粉粒的轮廓曲线具有较为明显的折线和锯齿。绿豆、豌豆和扁豆等豆类淀粉粒则具有不规则的波动曲线特征,这也与其淀粉粒轮廓较为光滑有关。燕麦淀粉粒的轮廓曲线的变化特征则介于这两种形态之间。由于淀粉粒形态较为复杂,因此直观的判断具有一定的不确定性。外形轮廓通过定量转化之后的外形轮廓曲线可以将不同样品的淀粉粒置于同一坐标系中进行比较,可以较为直观的进行分析。

2.3 小波图谱分析

淀粉粒轮廓线的小波图谱分析结果表明(图 5),不同杂粮的淀粉粒轮廓线小波图谱差异较大。由小波波谱值高值区和低值区构成的谱值闭合区个数可

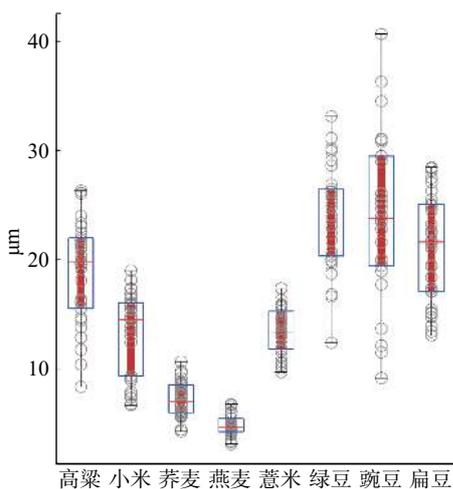


图3 8种杂粮淀粉粒粒径分布箱型图

Fig.3 Box-whisker plot of the particle size distribution of 8 kinds of coarse grain

可以看出,豆类淀粉粒具有较为光滑的淀粉粒形态,其小波谱闭合区也最为规律,其中绿豆和豌豆淀粉粒轮廓线具有完整的小波谱闭合区,扁豆的小波谱也较为规律,具有4.5个小波谱闭合区。燕麦由于具有半椭圆形的形态,其轮廓线小波谱也具有4个闭合区,但是存在一个闭合区特征不明显。高粱、小

米、荞麦和薏米的淀粉粒具有多边形特征,因此其小波谱闭合区表现较为复杂,往往具有不同大小的闭合区。这其中,薏米的淀粉粒形态虽然属于多边形,但是表面较为光滑,因此其小波谱也具有6个较为明显的闭合区。小波图谱可以将一维曲线转化为二维的图形,该图形类似于地形分析中常用的等高线系统,也存在波峰区和波谷区。如图5所示,在小波谱值的高值区和低值区即对应为波峰区和波谷区。这一明显的图谱特征可以为我们进一步分析不同类型的淀粉粒提供一个量化参数。

2.4 聚类分析

依据形态计量学方法所得到的特征参数作为聚类分析的变量因子,对8种杂粮淀粉粒进行分层聚类分析,结果如图6所示。三种豆类淀粉粒,绿豆、扁豆和豌豆聚为第一类;荞麦和高粱聚为第二类;薏米和小米聚为第三类;燕麦单独成为一类。这一聚类结果较好的体现了淀粉粒形态分析,以及其他淀粉粒形态计量参数的分析结果。三种豆类淀粉粒形态上更为接近,具有较为接近的粒径大小,多出现层纹和表面裂隙等。薏米、小米、荞麦和高粱淀粉粒都是多边形,因此在形态上也较为接近。燕麦由于具有较小的粒径均值,并且在形态上与其他杂粮淀粉粒差异较

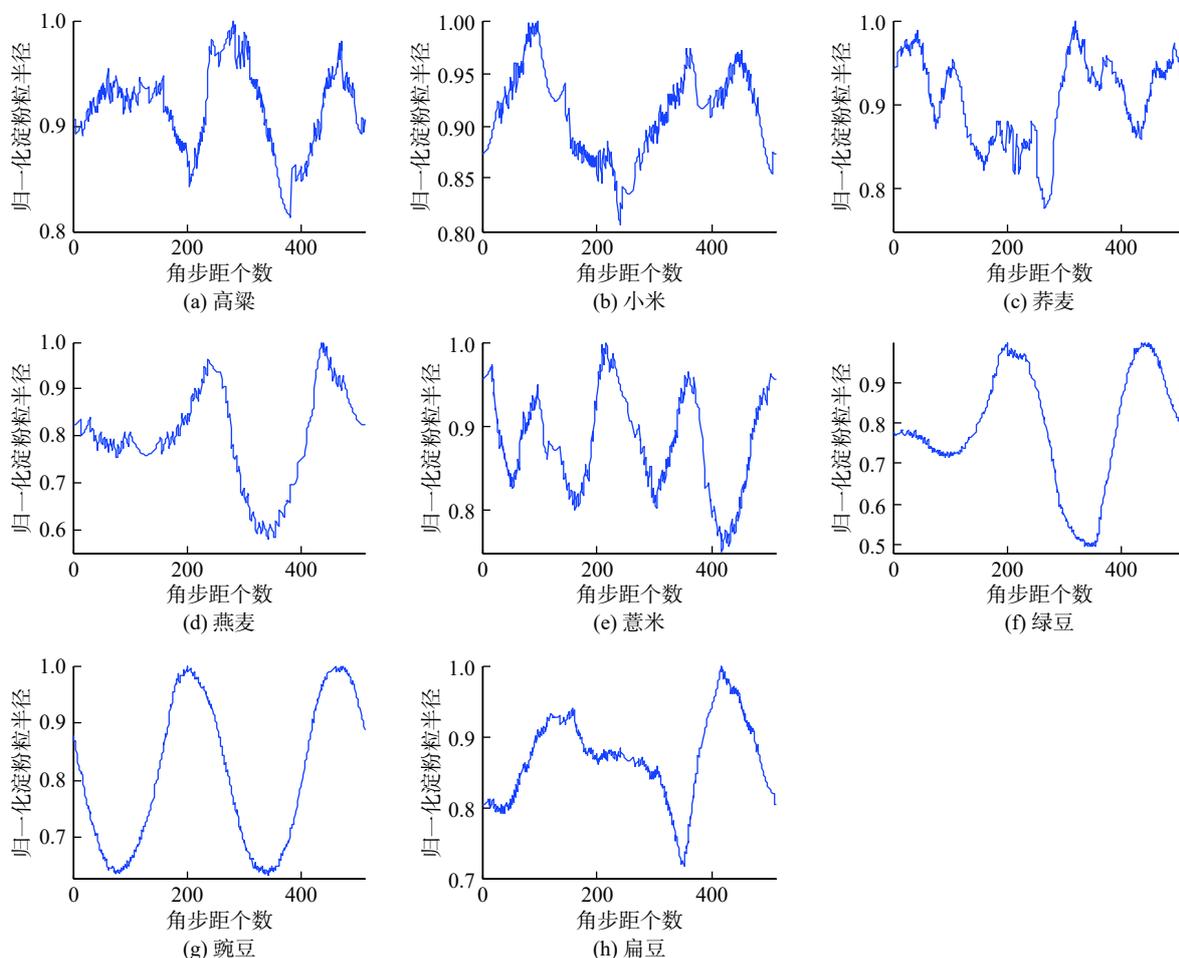


图4 8种杂粮淀粉粒轮廓曲线

Fig.4 Contour curves of starch grains of 8 kinds of coarse grain

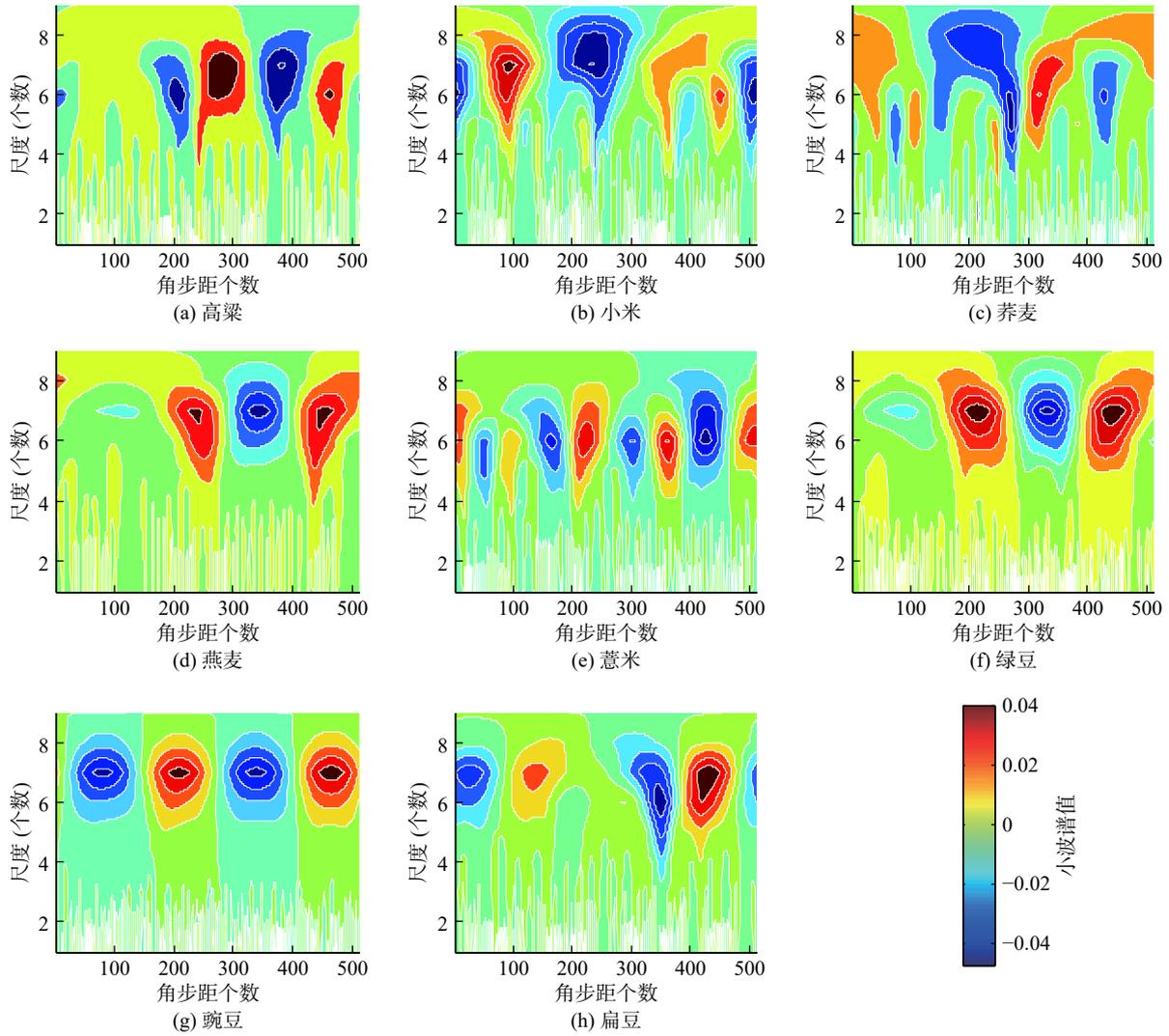


图 5 8 种杂粮淀粉粒形态轮廓线小波谱图

Fig.5 Wavelet spectrogram of morphological contour line of starches from 8 kinds of coarse grain

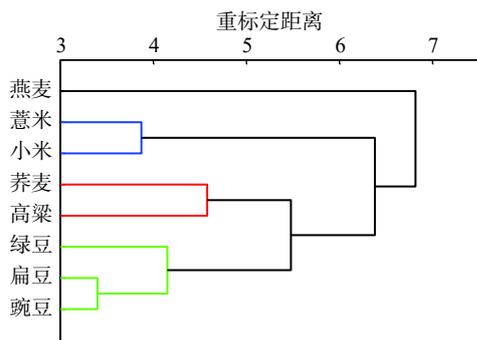


图 6 8 种杂粮淀粉粒聚类分析结果

Fig.6 Cluster analysis results of 8 kinds of coarse grain

大, 因此单独归为一类。

2.5 判别分析

对 8 种杂粮淀粉粒相关形态参数进行主成分分析, 结果显示在前 3 个主成分轴的方差贡献率分别为 38.554%、30.372% 和 25.261%, 累积解释方差贡献率为 94.187%, 可以较好地反映原始数据所携带的信息。因此, 按照 3 个主成分轴对 8 种杂粮淀粉粒进行坐标投影, 结果如图 7 所示。利用 SPSS 24 软

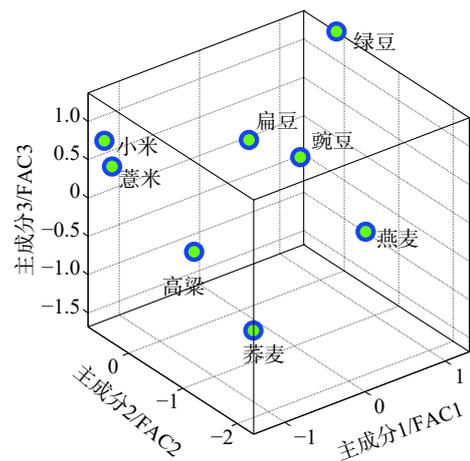


图 7 8 种杂粮淀粉粒判别分析投影图

Fig.7 Projection diagram of discriminant analysis of 8 kinds of coarse grain

件, 对主成分分析的结果进行判别方程的构建, 方程组为:

$$Y_1 = 0.083a + 0.081b - 0.020c - 0.100d + 0.110e + 0.107f - 0.118g - 0.006h + 0.026i - 0.112j - 0.103k - 0.035l +$$

$$0.074m+0.029n-0.125o+0.102p+0.105q+0.119r$$

$$Y_2=0.163a+0.154b+0.089c+0.091d-0.049e+$$

$$0.110f+0.051g-0.187h+0.090i-0.057j+0.061k-0.172l-$$

$$0.082m-0.194n+0.063o+0.051p-0.016q-0.074r$$

$$Y_3=0.074a+0.009b+0.254c-0.164d+0.143e-$$

$$0.007f-0.117g-0.132h+0.190i+0.067j+0.121k+0.155l+$$

$$0.208m+0.126n+0.116o-0.054p-0.106q-0.129r$$

式中, a=粒径均值, b=粒径标准差, c=盒维数, d=轮廓线均值, e=轮廓线标准差, f=层纹, g=凹坑, h=挤压面, i=裂隙, j=脐点, k=小波谱, l~r 分别代表 Hu 不变矩 1~7。其中, 参数 a~e 和 k~r 为数量值, 取值范围为具体数值; f~j 为名义变量, 取值范围为 0(未出现)或 1(出现)。

2.6 影响因素分析

对 8 种杂粮淀粉粒形态特征参数的 CCA 分析显示(图 8a), 代表粒径均值(Mean)、粒径标准差(Std)、Hu 不变矩 3(Hu3)、挤压面(JY)和 Hu 不变矩 1(Hu1)等特征的因子箭头长度最长, 说明这些特征是影响淀粉粒形态差异的主要因素。另外, 与前述因子相垂直方向上, Hu 不变矩 4(Hu4)、轮廓线均值(Lk_mean)、Hu 不变矩 7(Hu7)和轮廓线标准差(Lk_std)等指标也具有较大的影响。将各个影响因子变量线进行延长, 8 种杂粮淀粉粒样本垂直投影在相应射线上, 其投影落点越靠近箭头方向说明其受该因子影响就越大。以淀粉粒粒径均值为例, 绿豆、豌豆和扁豆的投影落点靠近箭头, 说明其影响较大, 而燕麦的投影落点离箭头最远, 说明其受该因子影响最小。由此可见, 在进行淀粉粒区分是, 当某一种因子不好进行淀粉粒识别和鉴定时, 可以选择其所受最大影响的因子进行分析。各影响因素之间的相关分析结果显示(图 8b), 全部影响因素可以分为两大类, 不同类型因子之间的相关系数存在差异, 这也为今后在

选取不同因素分别进行淀粉粒鉴定时提供了参考。

3 结论与讨论

综合利用淀粉粒形态计量相关参数指标, 对中国常见 8 种杂粮进行淀粉粒形态进行识别与鉴定。不同类型的杂粮淀粉粒在整体形貌、粒径大小等方面具有一定的差异。高粱、薏米、小米和荞麦的淀粉粒为多边形, 粒径均值和标准差为 18.931±4.720、13.499±2.183、13.482±3.699 和 7.194±1.599 μm; 豌豆、绿豆和扁豆淀粉粒为不规则椭圆形, 粒径均值和标准差为 24.008±7.327、23.895±4.706 和 21.001±4.943 μm; 燕麦淀粉粒为半椭圆形, 粒径均值和标准差为 4.861±0.951 μm。轮廓曲线量化分析结果显示, 谷类杂粮的多边形淀粉粒的轮廓曲线具有较为明显的折线和锯齿, 其小波谱闭合区表现较为复杂; 豆类淀粉粒轮廓线具有波动曲线特征, 其小波谱闭合区则较为规律; 燕麦的轮廓曲线和小波谱闭合区的相关特征则介于谷类杂粮和豆类之间。淀粉粒形态参数的聚类分析和判别分析的结果则显示, 8 种杂粮可以被区分为 4 大类, 并且不同淀粉粒可以通过判别方程得到较好的区分。CCA 分析和相关系数热图显示不同影响因子之间具有一定的差异性, 代表粒径均值、粒径标准差、Hu 不变矩 3、挤压面和 Hu 不变矩 1 等特征的因子箭头长度最长, 说明这些特征是影响淀粉粒形态差异的主要因素。在进行淀粉粒形态鉴定时 CCA 分析可以为不同淀粉粒的鉴定提供影响因子选择标准。

本次研究尝试利用形态计量学方法获得相关形态参数, 结合 CCA 分析等方法对 8 种杂粮的淀粉粒形态进行了研究。不同类型杂粮的淀粉粒具有不同的形态, 相关研究也显示^[33], 高粱、薏米、小米的淀粉粒呈多边形; 豆类淀粉粒则大部分属于椭圆形^[34], 并且具有较为明显的层纹和裂隙。轮廓曲线的研究同

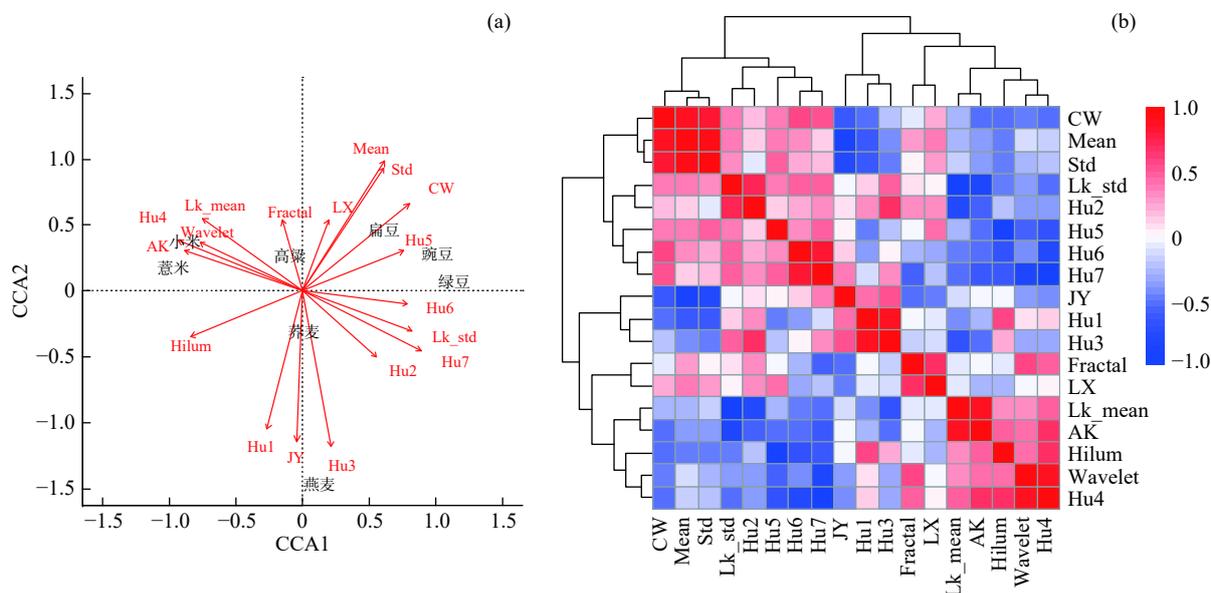


图 8 8 种杂粮淀粉粒 CCA 分析和相关系数热图

Fig.8 Canonical correspondence analysis and correlation coefficient heat map of 8 kinds of coarse grain

样显示^[23],水稻和玉米等多边形淀粉粒的轮廓较为曲折、土豆和山药等偏椭圆形的淀粉粒轮廓则较为平滑,这也与本次研究的结果一致。不同植物的淀粉粒形态由于基因和环境的差异具有不同的形态特征^[32],如何利用定量化的方法实现淀粉粒的自动鉴定具有重要的意义。今后的研究可以收集更多类型的杂粮以及其他植物样品,系统研究常见植物淀粉粒形态并构建数据库,以期为相关植物和食品鉴定提供依据。

参考文献

- [1] 林汝法,柴岩,廖琴. 中国小杂粮[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 1-372.
- [2] 谭斌,任保中. 杂粮资源深加工技术研究开发现状与趋势[J]. *中国粮油学报*, 2006, 21(3): 229-234.
- [3] 马宁,仇莉丽,章泽华,等. 食用菌复配即食杂粮粉的营养品质及特征风味成分分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(3): 251-258.
- [4] Abah C R, Ishiwu C N, Obiegbuna J E, et al. Nutritional composition, functional properties and food applications of millet grains[J]. *Asian Food Science Journal*, 2020, 14(2): 9-19.
- [5] Yankah N, Intifil F D, Tette E M A. Comparative study of the nutritional composition of local brown rice, maize (obaatanpa), and millet—A baseline research for varietal complementary feeding[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(6): 2692-2698.
- [6] Robinson G H J, Domoney C. Perspectives on the genetic improvement of health- and nutrition-related traits in pea[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 158: 353-362.
- [7] 吴飞虎,敬思群,王晓芸,等. 杂粮果蔬复合鲜面条的配方优化及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 125-130.
- [8] Chen L, Wu D, Schlundt J, et al. Development of a dairy-free fermented oat-based beverage with enhanced probiotic and bioactive properties[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 3140.
- [9] Yue J, Gu Z, Zhu Z, et al. Impact of defatting treatment and oat varieties on structural, functional properties, and aromatic profile of oat protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106368.
- [10] 陈树俊,张君梅,李佳益,等. 杂粮功能醋粉体内降血脂,辅助降血糖和抗氧化作用[J]. *食品科学*, 2019, 40(13): 155-160.
- [11] 陈新宇,兰凤英,张宗颖. 几种常见杂粮降血脂功效研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(8): 18-20.
- [12] 董洋,范志红,刘雅莉. 焙烤打粉杂粮的淀粉消化组分及餐后血糖反应[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(8): 261-267.
- [13] 孟婷婷,梁霞,周柏玲,等. 杂粮粉对马铃薯全粉淀粉糊化特性的影响[J]. *农产品加工*, 2019, 18(22): 27-29.
- [14] Bemiller J N, Whistler R L. Starch: Chemistry and technology[M]. Burlington: Academic Press, 2009: 1-879.
- [15] 万智巍,杨晓燕,李明启,等. 中国常见现代淀粉粒数据库[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(2): 371-372.
- [16] Tester R F, Karkalas J, Qi X. Starch: Composition, fine structure and architecture[J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39(2): 151-165.
- [17] Garcia-Granero J J. Starch taphonomy, equifinality and the importance of context: Some notes on the identification of food processing through starch grain analysis[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2020, 124: 105267.
- [18] Piperno D R, Weiss E, Holst I, et al. Processing of wild cereal grains in the upper palaeolithic revealed by starch grain analysis[J]. *Nature*, 2004, 430(7000): 670-673.
- [19] Devine J, Aponte J D, Katz D C, et al. A Registration and deep learning approach to automated landmark detection for geometric morphometrics[J]. *Evolutionary Biology*, 2020, 47(3): 246-259.
- [20] Hart P B, Niemiller M L, Burrell E D, et al. Cave-adapted evolution in the north american amblyopsid fishes inferred using phylogenomics and geometric morphometrics[J]. *Evolution*, 2020, 74(5): 936-949.
- [21] Davis L G, Bean D W, Nyers A J, et al. Glimr: A gis-based method for the geometric morphometric analysis of artifacts[J]. *Lithic Technology*, 2015, 40(3): 199-217.
- [22] Vezzetti E, Marcolin F. Geometrical descriptors for human face morphological analysis and recognition[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(6): 928-939.
- [23] 万智巍,李明启,贾玉连,等. 基于几何形态测量学的5种食物淀粉粒分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(12): 222-226.
- [24] 万智巍,李明启,李娅莹. 小麦族植物淀粉粒形态研究[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1020-1027.
- [25] 舒予,史令,赖思琦,等. 不同水深养殖栉孔扇贝的形态测量学研究和比较[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(1): 132-139.
- [26] 蔡小娜,黄大庄,沈佐锐,等. 蛾翅数学形态特征用于夜蛾分类和鉴定的可行性研究[J]. *昆虫学报*, 2012, 55(5): 596-605.
- [27] 温光华,白义,周娟,等. 基于几何形态测量学的五种稻蝗前后翅的形态变化研究[J]. *应用昆虫学报*, 2015, 52(2): 356-362.
- [28] 陈新军,方舟,苏杭,等. 几何形态测量学在水生动物中的应用及其进展[J]. *水产学报*, 2013, 37(12): 1873-1885.
- [29] Claude J. Morphometrics with R[M]. New York: Springer, 2008: 1-270.
- [30] Sit A, Shin W H, Kihara D. Three-dimensional Krawtchouk descriptors for protein local surface shape comparison[J]. *Pattern Recognition*, 2019, 93(9): 534-545.
- [31] Oksanen J, Guillaume B F, Kindt R, et al. Vegan: Community ecology package Version 2.0-10[J]. *Journal of Statistical Software*, 2006, 48(9): 103-132.
- [32] Henry A G, H F Hudson, Piperno D R. Changes in starch grain morphologies from cooking[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2009, 36(3): 915-922.
- [33] 葛威,刘莉,金正耀. 几种禾本科植物淀粉粒形态比较及其考古学意义[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(2): 377-384.
- [34] 李明启,葛全胜,王强,等. 青海卡约文化丰台遗址灰坑古代淀粉粒揭示的植物利用情况[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(2): 372-376.