

基于灰色定权聚类的小米品质综合评价

黄潇¹, 张洪¹, 蔡颖慧^{2*}

(1. 山西省科技资源与大型仪器开放共享中心, 食品营养与安全山西省重点实验室, 太原 030006;

2. 山西省生物研究院有限公司, 太原 030006)

摘要: **目的** 建立一种灰色定权聚类的评估方法, 减少小米品质评价过程中的主观性。**方法** 基于山西 11 个地区晋谷 21 号小米感官品质、营养品质和加工品质方面的基础数据, 构建白化权函数, 建立综合评价指标体系, 确定各小米样品所属的灰类。**结果** 对 11 个有代表性的小米品质的灰色定权聚类结果表明: A₄、A₈、A₁₀ 属于“高”灰类产品, A₁、A₃、A₅、A₆、A₉ 属于“中”灰类, 而 A₂、A₇、A₁₁ 属于“低”灰类, 即沁县、汾阳、原平 3 个地区产出的小米品质优良, 阳曲、神池、榆社、浮山、山阴 5 个地区产出的小米品质中等, 浑源、阳城、芮城 3 个地区产出的小米综合品质较次。**结论** 灰色定权聚类结果与实际情况相吻合, 表明构建的小米综合品质灰色定权聚类评估方法可靠。

关键词: 小米; 灰色定权聚类; 白化权函数; 综合评价

Comprehensive assessment of millet quality based on gray fixed weight cluster

HUANG Xiao¹, ZHANG Hong¹, CAI Ying-Hui^{2*}

(1. Shanxi Sharing Center of Science and Technology Resources and Large Instruments, Key Laboratory of Food Nutrition and Safety of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Academy of Biology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: Objective To establish an evaluation method of grey fixed weight cluster to reduce the subjectivity in the process of millet quality evaluation. **Methods** Based on the basic data on the sensory quality, nutritional quality and processing quality of Jingu 21 millet from 11 regions in Shanxi province, the whitening weight function was constructed, the comprehensive evaluation index system was established, and the gray class of each millet sample was determined. **Results** The results of grey fixed-weight cluster for the 11 representative millet qualities showed that A₄, A₈ and A₁₀ belonged to "high" gray products, while A₁, A₃, A₅, A₆ and A₉ belonged to "medium" gray products, while A₂, A₇ and A₁₁ belonged to "low" gray products, in other words, the millet produced in Qinxian, Fenyang and Yuanping regions were of good quality. The millet produced in Yangqu, Shencheng, Yushe, Fushan and Shanyin regions were of medium quality, while the millet produced in Hunyuan, Yangcheng and Ruicheng regions were of poor comprehensive quality. **Conclusion** The results of gray fixed weight cluster evaluation are consistent with the actual situation, which shows that the established gray fixed weight cluster evaluation method for

基金项目: 山西省青年科技研究基金项目(201601D202088)、山西省科技攻关项目(201805D111018)、山西省软科学研究计划项目(2019041005-4)

Fund: Supported by the Youth Science and Technology Research Foundation of Shanxi Province (201601D202088), the Science and Technology Project of Shanxi Province (201805D111018), and the Shanxi Province Soft Science Research Project (2019041005-4)

***通信作者:** 蔡颖慧, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为食品微生物学。E-mail: jinsixiong1@163.com

***Corresponding author:** CAI Ying-Hui, Master, Associate Professor, Shanxi Academy of Biology Co., Ltd., No.129, Binhexi Road, Wanbailin District, Taiyuan 030006, China. E-mail: jinsixiong1@163.com

multi-indexes comprehensive assessment of millet is reliable.

KEY WORDS: millet; gray fixed weight cluster; whitening weight function; comprehensive assessment

0 引言

小米是谷子脱壳后的产物,又名粟,禾本科狗尾草属植物,曾是中国北方长期主栽作物,具有适应性广、抗旱耐瘠、粮饲兼用等特点。小米为一种小宗粮食作物,在国内农业产业发展和结构调整中占有重要地位^[1-2],以山西、山东、河北、辽宁、内蒙古等省份产量最多,占全国总产量的 80%以上^[3-4]。小米营养丰富,且具有降糖、抗癌等多种功效^[5],是一种优良杂粮作物。但长久以来在人们饮食中所占比例较低,平均仅占大米的 2%,小麦的 8%^[6]。随着社会、科技的发展,人类健康饮食意识、膳食结构和消费理念的变化,人们开始更多地消费有益于健康的杂粮。因此,对小米产品的品质要求已不仅局限于其色泽、口感,对其营养品质和加工特性等方面也提出了更高的要求。目前已有不少专家学者对小米的糊化特性、质构特性、营养品质和感官品质等方面及相关性进行了研究。研究表明,小米粉的质构特性与小米粉糊化后的最终粘度有关。糊化温度和糊化时间与峰值粘度、崩解值、最终粘度等呈正相关,与粗蛋白质、粗脂肪和支链淀粉含量呈负相关。咀嚼性大、弹性大、硬度适中的小米,成型性、加工性能好,适合用于凉粉和速食性食品的加工;直链淀粉含量高、咀嚼性和硬度大的小米适合做米粥^[7-12]。但是目前尚未建立对其外观品质、营养品质、加工品质等方面进行综合评价的评估体系。目前对小米的分类、质量检验,多数依据 GB/T 11766—2008《小米》标准规定进行。传统的评估方法在因素选取方面具有一定的局限性,且评价信息的不完整往往导致评估结果定性成分居多、精确率较差。小米品质综合评价体系的滞后性,不仅给生产、深加工企业造成困扰,也给小米及小米深加工产品的质量带来极大的不确定性,一定程度上阻碍小米及小米深加工行业的健康发展。因此,建立一种对小米品质综合评价的方法,对于保障消费者安全、健康的食用,对于促进小米生产、深加工等行业的管理都十分必要。

小米品质综合评价的指标因素较多,部分指标容易受主观判断、测试误差等因素影响;同时各因素与小米品质评估之间的关系不明确,实测数据也是波动的,难以用准确的数学模型来表示。因此,小米品质的综合评价系统,可以看作是一个小样本、贫信息的灰色系统。灰色系统分析通过利用模糊评价系统对多个指标进行综合评价,包括灰色关联、灰色聚类 and 灰色统计评估 3 种方法。灰色聚类可解决生产、生活和科研过程中的实际问题,在安全评估、环境评价、装备保障以及食品安全等领域应用广泛^[13-17]。晋谷 21 号为山西省农科院选育的优良谷子品种,具有品

质突出、高产、适应性广、粮草兼丰、抗逆性强等优势,种植范围较广^[18]。本研究就是以此为出发点,根据山西省 11 个产地晋谷 21 号小米的部分已知信息,建立一种基于灰色定权聚类的小米品质综合评价方法,以期为小米种植生产、深加工企业及相关管理部门提供一个简单有效的综合评价方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小米(晋谷 21 号,分别产自山西阳曲、浑源、神池、沁县、榆社、浮山、阳城、汾阳、山阴、原平、芮城 11 个地区),采集时间为 2020 年 10 月上旬。

甲醇、乙醚、无水硫酸钠、硫代硫酸钠(试剂纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

XMJ100 碾米机(山东鱼台金利粮油机械公司); FOSS Kjeltec TM2300 全自动凯氏定氮仪(丹麦 FOSS 集团); SERI48 脂肪测定仪(嘉盛香港科技有限公司); Viscograph-E 粘度仪(德国 Brabender 仪器公司)。

1.3 实验方法

采集晋谷 21 号成熟后加工的新小米。每个产地小米取样分 3 份,每份 100 g。每个样品平行测定 3 次,取平均值。

1.3.1 指标数据测定

小米综合品质检测指标主要分为感官指标、营养指标和加工指标 3 大类,分别采用以下方法测定:

(1)感官评定

请 7 名专家对小米的粒形、色泽、食味指标进行感官评价,评价参照 GB/T 11766—2008 进行。分 3 个等级进行评价打分,品质越好,分数越高,满分为 100。小米感官评分标准如表 1 所示。

表 1 小米感官评定标准
Table 1 Standards for the sensory evaluation of the millet

评分	粒形	色泽	食味
≥85	颗粒均匀饱满,表面光滑	鲜黄明亮	香味浓郁,软而不结,适口性好
60~85	粒形完整,大小不均,表面较光滑	淡黄色,光泽不足	有天然小米香味,无异味,稍硬或过软
≤60	颗粒不均匀、不饱满,表面粗糙	颜色发暗或有异色	无小米香味或有明显异味,软烂或夹生感严重

(2)营养成分测定

将不同地区的小米样品粉碎成小米粉, 过 60 目筛备用。粗蛋白质测定: 参照 GB/T 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》; 粗脂肪测定: 参照 GB/T 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》; 淀粉测定: 参照 GB/T 5009.9—2016《食品中淀粉的测定》; 粗纤维测定: 参照 GB/T 5009.10—2003《植物性食品中粗纤维的测定》; 灰分测定: 参照 GB 5009.4—2016《食品中灰分的测定》。

(3)加工指标测定

选取回生值、糊化时间、峰值粘度作为小米加工品质评价指标^[19]。回生值、粘度等指标测定参照 GB/T 22427.7—2008《淀粉粘度测定》方法进行。

1.3.2 灰色定权聚类评估模型构建

灰色定权聚类法是建立在白化函数基础上的一种多维灰色评估方法, 以建立数学模型为基本手段, 通过构建灰类型的白化权函数综合权系数矩阵, 按若干灰类进行归纳, 从而判断出聚类对象属于哪一个灰类。模型构建方法包括以下几个过程^[20]:

(1)构建评估指标体系

根据小米常用质量检测指标, 建立小米综合品质评估指标体系。设有 n 个聚类样本, m 个聚类指标, 即 n 个小米品种的 m 个聚类指标, 根据第 i 个对象($i=1, 2, \dots, n$)的第 m 个指标($j=1, 2, \dots, m$), 按照不同的标准分为不同灰类进行评估。

(2)确定灰类界限, 建立白化权函数

对于一个评估系统, 需确定指标的灰度界限(本研究中灰度等级分高、中、低三类), 建立指标灰度等级对应的白化权函数。白化权函数是灰色聚类评估过程中由定性分析到定量建模的关键环节, 是对灰类内各元素取值可能性大小的函数形式表达^[21-23]。在实际评估当中, 聚类指标的意义和物理量纲不同, 而且往往在数量上相差比较悬殊, 所以常常采用白化权灰色定权聚类法进行方评估。通常来讲, 白化权函数包括 3 种基本数学模型类型:

(a)高类型

$$f \frac{1}{j} \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq G \\ \frac{x_{ij}-Z}{G-Z}, & Z < x_{ij} < G \\ 0 & x_{ij} \leq Z \end{cases}$$

(b)中类型

$$f \frac{2}{j} \begin{cases} 0, & x_{ij} \geq G \\ \frac{G-x_{ij}}{G-Z}, & Z < x_{ij} < G \\ \frac{x_{ij}-D}{Z-D}, & D < x_{ij} < Z \\ 1 & x_{ij}=Z \\ 0 & x_{ij} \leq D \end{cases}$$

(c)低类型

$$f \frac{3}{j} \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq D \\ \frac{Z-x_{ij}}{Z-D}, & D < x_{ij} < Z \\ 0 & x_{ij} \geq Z \end{cases}$$

以上公式中: x_{ij} 代表样品的指标值, G 、 Z 、 D 分别代表高类型的下限, 中类型的中限, 低类型的上限。其中, $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

(3)确定各聚类指标的权重

模型中各指标的聚类权重采用层次分析法进行确定^[24]。

(4)计算各聚类对象的定权聚类系数

将计算所得的权系数矩阵的对应值分别进行加权平均, 然后合并矩阵, 可得综合权系数矩阵, 得到各对象在 k 灰度等级下的定权聚类系数。

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f \frac{k}{j} (x_{ij}) \cdot \eta_j$$

以上公式中: σ_i^k 为对象 i 所属的 k 灰类的灰色定权聚类系数, η_j 为 j 指标的权, $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$; $k=1, 2, \dots, s$ 。

(5) 判断各聚类对象所属灰类

设 $\sigma_i^{k*} = \max\{\sigma_i^k\}$, 则称该聚类对象的灰度等级为 k 。

2 结果与分析

2.1 小米品质综合评估指标体系的建立

小米综合品质评估是一个多指标、多因素的系统, 要评价其质量情况, 必须先建立一套科学的评价体系。根据小米生产加工及营养品质特点, 建立如下指标评估体系, 见图 1。

结合小米生产、加工企业常用质量检测指标, 选取有代表性的部分检测指标作为聚类指标, 分别为: 粒形、色泽、食味、粗蛋白、粗脂肪、淀粉、粗纤维、灰度、糊化时间、峰值粘度、回生值, 共 11 个指标(即 $j=1, 2, \dots, 11$), 以 11 个有区域代表性的小米样品作为聚类样本(即 $i=1, 2, \dots, 11$)。其中粒形、色泽、食味为感官指标, 粗蛋白、粗脂肪、淀粉、粗纤维、灰度为营养指标, 糊化时间、峰值粘度、回生值为加工指标。由于粒形、色泽、粗蛋白等感官指标和营养指标为正向指标, 因此分别以专家打分和测定结果为原数据; 糊化时间、峰值粘度、回生值为负向指标, 因而需对其原测定数据取倒数以进行无量纲化处理。

分别以 $A_1, A_2, \dots, A_{11}$ 代表阳曲、浑源、神池、沁县、榆社、浮山、阳城、汾阳、山阴、原平、芮城 11 个地区的小米样品, 各小米样品相应指标测定数值见表 2。

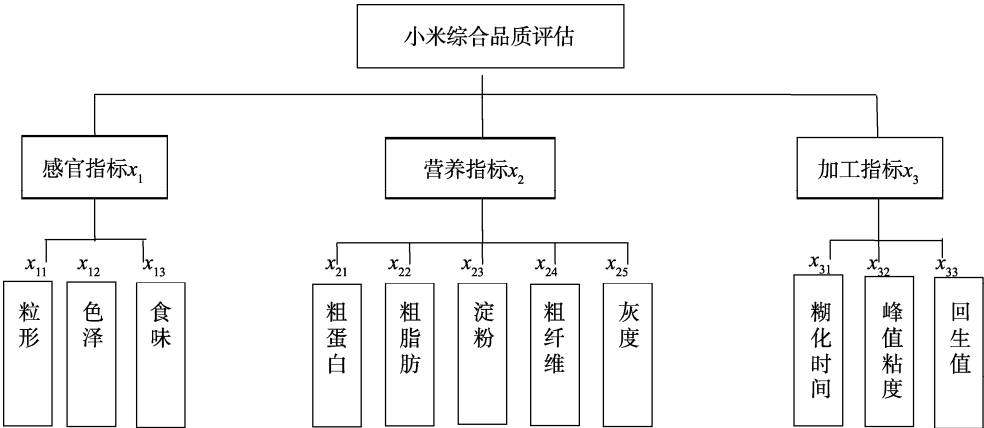


表 2 小米样品各指标测定值
Table 2 Measured values of various indexes of millet samples

样本	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}
	粒形	色泽	食味	粗蛋白/%	粗脂肪/%	淀粉/%	粗纤维/%	灰度/%	糊化时间/min	峰值粘度/BU	回生值/BU
A ₁	86	82	81	13.03	3.25	70.54	0.59	1.52	11.24 ⁻¹	256 ⁻¹	189 ⁻¹
A ₂	80	78	79	9.45	2.74	61.02	0.22	1.36	13.56 ⁻¹	315 ⁻¹	294 ⁻¹
A ₃	82	84	80	12.26	4.66	72.36	0.61	1.06	10.56 ⁻¹	219 ⁻¹	176 ⁻¹
A ₄	88	86	90	13.49	5.04	75.39	0.81	1.48	8.56 ⁻¹	163 ⁻¹	147 ⁻¹
A ₅	85	80	82	10.68	3.97	71.16	0.54	1.43	8.97 ⁻¹	224 ⁻¹	196 ⁻¹
A ₆	83	79	80	11.37	3.41	72.84	0.51	1.26	12.04 ⁻¹	219 ⁻¹	188 ⁻¹
A ₇	78	82	79	9.24	2.15	63.85	0.27	0.68	15.21 ⁻¹	342 ⁻¹	311 ⁻¹
A ₈	85	87	82	13.46	5.14	74.16	0.89	1.53	9.64 ⁻¹	188 ⁻¹	139 ⁻¹
A ₉	80	76	82	11.98	3.04	73.95	0.39	1.28	11.18 ⁻¹	231 ⁻¹	201 ⁻¹
A ₁₀	86	80	86	13.17	5.11	76.38	0.81	1.55	10.21 ⁻¹	192 ⁻¹	142 ⁻¹
A ₁₁	82	78	79	10.74	2.43	58.97	0.33	0.74	14.47 ⁻¹	299 ⁻¹	284 ⁻¹

感官指标是最直接的表现指标，通过看、闻、品等方法可获得小米的感官品质评定^[25]。粗蛋白、粗脂肪、淀粉、粗纤维、灰度等为营养成分指标，可直接影响到小米品质的优劣。糊化时间、峰值粘度和回生值是淀粉类食品加工最重要的评价指标。糊化时间、峰值粘度和回生值越高，指标值越大，说明小米糊化需要的时间越长，热糊稳定性和冷糊稳定性越低，老化速度越快，大米制品易出现硬度增加、水分减少等现象，导致口感变差、保质期缩短，影响小米产品的品质及货架期等^[26-27]。

2.2 各指标灰类界限的确定

在本研究构建的小米品质综合评估指标系统中，各

样品指标界限的确定主要是结合小米质量检验标准及食品加工相关理论。将小米样品的 11 项检测指标矩阵按高、中、低三类归类，计算综合权系数矩阵。将综合权系数分为 3 个灰类，灰类序号为 k ($k=1,2,3$) 分别表示“高”灰类、“中”灰类和“低”灰类。各指标的类别界限如表 3 所示。

2.3 确定各指标权重

层次分析法是常用的一种多目标决策分析方法，在指标复杂而且缺乏必要的情况下，可将决策者的经验判断给予量化，将定性与定量分析相结合进行分析决策，在食品工业应用广泛^[28-30]。采用层次分析法计算小米样品各指标权重，详见表 4。

赋予聚类指标权重时, 需要综合考虑指标性能的实用性及指标数据的可靠性, 确保权重值准确可靠。在小米综合品质评价体系中, 聚类指标可以分为三类: 感官指标、营养指标和加工指标。总的来讲, 营养指标对小米综合品质的影响要大于其他两类指标。其中淀粉和蛋白质影响权重比较大, 回生值、峰值粘度等影响次之。

2.4 计算综合权系数矩阵并判断各样点所属灰类

根据灰色定权聚类模型, 计算综合权系数矩阵, 可知灰色定权聚类系数最大值所对应的等级即为所属的灰类。将小米样品检测数据带入到聚类模型中计算, 结果显示样品 A₄、A₈、A₁₀ 属于“高”类产品, A₁、A₃、A₅、A₆、A₉ 属于“中”类, 而 A₂、A₇、A₁₁ 属于“低”类。这说明, 在 11 件小米样品中, 3 个属于高灰类, 5 个属于中灰类, 3 个属于低灰类。即沁县、汾阳、原平 3 个地区产出的小米综合品质

优良, 浑源、阳城、芮城 3 个地区产出的小米综合品质较次, 其余地区产出的小米综合品质中等。

从实验中可以看出, 晋谷 21 号主要属于优良低直链淀粉品种, 不同产地小米在外观上差别不大; 淀粉和粗蛋白对其综合品质影响较大, 呈正相关; 糊化时间、峰值粘度和回生值与小米综合品质呈负相关。沁县、汾阳、原平 3 个地区产出的小米淀粉和粗蛋白含量高, 硬度和胶黏性适中, 加工性能好, 质量最优; 浑源、阳城、芮城 3 个地区产出的小米糊化时间、峰值粘度和回生值高, 综合质量较次, 不适合进行食品加工。晋谷 21 号更适宜在山西沁县、汾阳、原平地区推广种植及深加工。

为进一步检验小米综合品质灰色定权聚类评估方法的可靠性, 将聚类结果与按照表 1 进行专家评鉴打分法相对比, 比较结果见表 5。

表 3 小米样品各指标的灰类界限
Table 3 Gray boundaries of each index of millet indicators

准则	指标	单位	高	中	低
感官指标 x_1	x_{11} 粒形	分数	$85 \leq x_{11} \leq 100$	$60 < x_{11}^2 < 85$	$x_{11}^3 \leq 60$
	x_{12} 气味	分数	$85 \leq x_{12} \leq 100$	$60 < x_{12}^2 < 85$	$x_{12}^3 \leq 60$
	x_{13} 食味	分数	$85 \leq x_{13} \leq 100$	$60 < x_{13}^2 < 85$	$x_{13}^3 \leq 60$
营养指标 x_2	x_{21} 粗蛋白	%	$13 \leq x_{21} \leq 15$	$11 < x_{21}^2 < 13$	$9 \leq x_{21}^3 \leq 11$
	x_{22} 粗脂肪	%	$5 \leq x_{22} \leq 6$	$4 < x_{22}^2 < 5$	$2 \leq x_{22}^3 \leq 4$
	x_{23} 淀粉	%	$72 \leq x_{23} \leq 80$	$65 < x_{23}^2 < 72$	$55 \leq x_{23}^3 \leq 65$
	x_{24} 粗纤维	%	$0.8 \leq x_{24} \leq 1$	$0.5 < x_{24}^2 < 0.8$	$0.2 \leq x_{24}^3 \leq 0.5$
	x_{25} 灰度	%	$1.5 \leq x_{25} \leq 2$	$1 < x_{25}^2 < 1.5$	$0.5 \leq x_{25}^3 \leq 1$
加工指标 x_3	x_{31} 糊化时间	min	$10^{-1} \leq x_{31} \leq 8^{-1}$	$12^{-1} \leq x_{31}^2 \leq 10^{-1}$	$14^{-1} \leq x_{31}^3 \leq 12^{-1}$
	x_{32} 峰值粘度	BU	$200^{-1} \leq x_{32} \leq 150^{-1}$	$300^{-1} \leq x_{32}^2 \leq 200^{-1}$	$400^{-1} \leq x_{32}^3 \leq 300^{-1}$
	x_{33} 回生值	BU	$150^{-1} \leq x_{33} \leq 100^{-1}$	$200^{-1} \leq x_{33}^2 \leq 150^{-1}$	$250^{-1} \leq x_{33}^3 \leq 200^{-1}$

表 4 小米品质指标权重
Table 4 Weight of millet quality index

x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{31}	x_{32}	x_{33}
0.06	0.06	0.08	0.12	0.09	0.14	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11

表 5 小米品质灰色定权聚类评估与专业评估的结果比较
Table 5 Gray fixed weight cluster evaluation results of millet comparing with the professional assessment method

评估方法	小米样品										
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁
灰色定权聚类	2	3	2	1	2	2	3	1	2	1	3
专业评估	2	3	2	1	2	2	3	1	2	1	3

注: 1 表示“优”类产品; 2 表示“中”类产品; 3 表示“较次”类产品。

目前,以专家评定打分分类的传统方法仍是小米品质优劣评价的主要方法,从灰色聚类评估方法与专家打分方法比较的结果可以看出,本研究建立的模型聚类结果与专家评价非常吻合,可以很好地反映出小米综合品质的实际情况。

3 结 论

由灰色定权聚类评估结果可知,在11件小米样品中,3件属于高灰类,5件属于中灰类,3件属于低灰类,即沁县、汾阳、原平3个地区产出的小米综合品质优良,阳曲、神池、榆社、浮山、山阴5个地区产出的小米品质中等,其余地区产出的小米品质较差。结果与传统评价比较方法相一致,由此可以推断,灰色定权聚类评估应用于小米品质综合分析切实可行。本研究中构建的灰色定权聚类评估系统,可以最大程度地利用小米指标检测数据,尽可能减少人为主观因素对评估结果的影响,计算简单,结论明确,可为小米生产企业及相关部门小米品质综合评价提供一个科学、快速有效的评价方法,为晋谷21号在不同地域推广及小米深加工提供重要的理论依据。

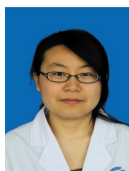
参考文献

- [1] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 新时期中国谷子产业发展技术需求与展望[J]. 农学学报, 2018, 8(6): 96–100.
LI SG, LIU F, LIU M, *et al.* Technology need and prospect of foxtail millet industry development in China in the new era [J]. J Agric, 2018, 8(6): 96–100.
- [2] 李艳, 马庆州, 王彦辉, 等. 谷子种质资源重要性状的统计分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 88–91.
LI Y, MA QZ, WANG YH, *et al.* Statistical analysis of important characters of millet germplasm resources [J]. Jiangsu Agric Sci, 2020, 48(5): 88–91.
- [3] JIANG YM, XIANG JY, LI HQ, *et al.* Yielding ability and stability and adaptability of proso millet varieties [J]. Asian Agric Res, 2018, 10(5): 82–84.
- [4] 解云, 李强, 郭世华. 30份谷子品种农艺性状的遗传多样性及相关性[J]. 分子植物育种, 2020, 18(9): 3079–3085.
XIE Y, LI Q, GUO SH. Genetic diversity and correlation of agronomic traits in 30 foxtail millet cultivars [J]. Mol Plant Breed, 2020, 18(9): 3079–3085.
- [5] SHAN S, LI Z, NEWPONI P, *et al.* A novel protein extracted from foxtail millet bran displays anti-carcinogenic effects in human colon cancer cells [J]. Toxicol Lett, 2014, 227(2): 129–138.
- [6] REN X, YIN R, HOU D, *et al.* The glucose-lowering effect of foxtail millet in subjects with impaired glucose tolerance: A self-controlled clinical trial [J]. Nutrients, 2018, 10(10): 1509.
- [7] 韦露露, 秦礼康, 王安燕, 等. 基于主成分分析的不同品种小米品质评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 49–56.
WEI LL, QIN LK, WEN AY, *et al.* Quality evaluation of different varieties millet based on principal components analysis [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(9): 49–56.
- [8] SANDHU KS, SIROHA AK. Relationships between physicochemical, thermal, rheological and *in vitro* digestibility properties of starches from pearl millet cultivars [J]. LWT-Food Sci Technol, 2017, 83: 213–224.
- [9] SMITA S, SUIL G, GANAPATHY KN, *et al.* Genetic variability and association analysis for grain yield and nutritional quality in foxtail millet [J]. Int J Bio Stress Manage, 2016, 7(6): 1239–1243.
- [10] 谢仲寅, 任欣, 张敏, 等. 小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 13–19.
XIE ZY, REN X, ZHANG M, *et al.* Difference of physicochemical properties and nutritional quality between raw and extruded foxtail millet flour [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(22): 13–19.
- [11] DHARMARAJ U, RAVI R, MALLESHI NG. Cooking characteristics and sensory qualities of decorticated finger millet (*Eleusine comcana*) [J]. J Culi Sci Technol, 2014, 12(3): 215–228.
- [12] 穆秋霞, 崔素萍, 张卓敏, 等. 黑龙江主栽小米品种品质特性及其相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(7): 26–32.
MU QX, CUI SP, ZHANG ZM, *et al.* Analysis correlation and quality properties on main cultivar millets in Heilongjiang province [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2019, 34(7): 26–32.
- [13] SHAO ML, GONG ZW, XU XX. Risk assessment of rainstorm and flood disasters in China between 2004 and 2009 based on gray fixed weight cluster [J]. Nat Hazard, 2014, 71(2): 1025–1052.
- [14] 蓝燕金, 简文彬, 罗金妹, 等. 基于灰色定权聚类模型的公路边坡水毁风险等级评价[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 101–107.
LAN YJ, JIAN WB, LUO JM, *et al.* Risk grade evaluation of highway slope water damage based on grey fixed-weight cluster model [J]. J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed), 2021, 49(1): 101–107.
- [15] YAO TX, CHENG WR, GAO H. The natural disaster damage assessment of Sichuan province based on grey fixed-weight cluster [J]. Grey Syst, 2016, 6(3): 415–425.
- [16] 单晓霖, 焦朋朋. 基于灰色聚类分析法的城乡公交运营质量评价[J]. 北京建筑大学学报, 2021, 37(1): 16–24.
SHAN XL, JIAO PP. Evolution of urban-rural public transit operation quality based on grey clustering analysis [J]. J Beijing Univ Civil Eng Archit, 2021, 37(1): 16–24.
- [17] WU X, JIA WL, LI ZR. Synthetic evaluation of natural gas pipeline operation schemes based on the multi-level grey cluster decision method [J]. Arab J Sci Eng, 2019, 44(6): 6045–6056.
- [18] 田志芳, 冯耐红, 周柏玲, 等. 不同产地晋谷21号品质性状与淀粉特性研究[J]. 农产品加工(创新版), 2009, (8): 33–37.
TIAN ZF, FENG NH, ZHOU BL, *et al.* The study of the quality and the starch property of Jingu 21 from different producing area [J]. Farm Prod Process, 2009, (8): 33–37.
- [19] 宋玉, 曹磊, 夏青, 等. 不同处理方式对糙米淀粉回生特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(10): 82–86.
SONG Y, CAO L, XIA Q, *et al.* The effect of different treatment methods on the retrogradation properties of brown rice starch [J]. Food Res Dev, 2018, 39(10): 82–86.
- [20] 黄潇. 灰色聚类评估法对冷冻鱼糜品质分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 106–110.
HUANG X. Research of gray clustering evaluation on frozen surimi quality [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(10): 106–110.
- [21] LIANG HB, SUN YQ, LI GL, *et al.* Gray relational clustering model for

- intelligent guided monitoring horizontal wells [J]. *Neural Comput Appl*, 2019, 31(5): 1339–1351.
- [22] ZHENG JC, CHEN XJ, QIU SH, *et al.* Application of grey entropy weight cluster in clinical department sorting [J]. *Grey Syst*, 2019, 9(2): 224–231.
- [23] YU R, LI DF, WANG HY, *et al.* Evaluating raw milk quality by an optimized grey cluster evaluation model in China [J]. *Grey Syst*, 2017, 29(3): 99–109.
- [24] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(3): 183–192.
- ZHANG XD, LIU XN, ZHAO ZP, *et al.* Geological disaster hazard assessment in Yanchi county based on AHP [J]. *Remote Sens Land Resour*, 2019, 31(3): 183–192.
- [25] 鄢倩茹, 胡萌萌, 张丽玲, 等. 小米油脂成分含量与小米粥感官品质的相关性[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(4): 38–46.
- QIE QR, HU MM, ZHANG LL, *et al.* Correlation between vegetable oils contents and sensory quality in foxtail millet [J]. *J China Agric Univ*, 2021, 26(4): 38–46.
- [26] 张桂英, 杜文娟, 王玲, 等. 小米品种特性与米发糕品质特性的相关性研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(10): 168–173.
- ZANG GY, DU WJ, WANG L, *et al.* Correlation between variety characteristic of different millet and quality properties of steamed millet sponge cake [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(10): 168–173.
- [27] ZHANG YK, GAO JH, QIE QR. Comparative analysis of flavonoid metabolites in foxtail millet (*Setaria italica*) with different eating quality [J]. *Life*, 2021, 11(6): 578.
- [28] 孟晶岩, 李敏, 张倩芳, 等. 不同加工条件对小米膳食纤维品质及理化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(11): 123–125.
- MENG JY, LI M, ZHANG QF, *et al.* The effects on quality and physicochemical properties of milled dietary fiber under different processing conditions [J]. *J Cere Oils*, 2020, 33(11): 123–125.
- [29] KUMAR R, ANBALAGAN R. Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri reservoir rim region, Uttarakhand [J]. *J Geol Soc India*, 2016, 87(3): 271–286.
- [30] BARIRA R, JAVED I, SU LJ. Landslide susceptibility analysis of Karakoram highway using analytical hierarchy process and scoops 3D [J]. *J Mount Sci*, 2020, 17(7): 1596–1612.

(责任编辑: 张晓寒 郑丽)

作者简介



黄 潇, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: huangxiao418@163.com



蔡颖慧, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为食品微生物学。

E-mail: jinsixiong1@163.com