

# 基于改进 AHP 和灰色关联度分析法用于 稻米蛋白质营养学评价

Study on nutritional evaluation of rice protein based on  
modified AHP and grey correlation analysis

肖 轲<sup>1,2</sup> 苏东林<sup>1,2</sup> 李志坚<sup>1,2</sup> 尚雪波<sup>1,2</sup>

XIAO Ke<sup>1,2</sup> SU Dong-lin<sup>1,2</sup> LI Zhi-jian<sup>1,2</sup> SHANG Xue-bo<sup>1,2</sup>

(1. 湖南省农产品加工研究所, 湖南 长沙 410125;

2. 农产品质量安全风险评估与营养功能评价创新团队, 湖南 长沙 410125)

(1. Hunan Agricultural Products Processing Institute, Changsha, Hunan 410125, China;

2. Innovation Team of Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment and  
Nutritional Function Evaluation, Changsha, Hunan 410125, China)

**摘要:**对 3 个生产基地 8 个晚籼品种的 24 份稻米的蛋白质和氨基酸组成进行了测定。以 FAO/WHO 氨基酸标准模式为参考, 利用改进层次分析法与灰色关联度分析相结合的方法建立稻米蛋白质综合评价模型, 并对评价模型用于评价蛋白质营养价值的可行性进行了验证。结果显示, 不同基地及不同品种间稻米蛋白质品质存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 加权灰色关联度法与 PER、NPR 的相关系数  $r$  分别为 0.959 ( $P = 0.003$ ), 0.974 ( $P = 0.001$ )。表明加权灰色关联度与蛋白质生物学指标高度相关, 能够较为科学、有效地表征稻米蛋白质的营养品质。

**关键词:**氨基酸; 蛋白质营养学评价; 改进层次分析; 灰色关联度分析

**Abstract:** The protein and amino acid composition of 24 rice samples from 8 late indica varieties in three production bases were determined. With FAO/WHO provisional pattern of amino acids as reference, a comprehensive evaluation model for rice protein was established by combining modified analytic hierarchy process (AHP) with grey correlation analysis, and the feasibility of the evaluation model in evaluating the nutritional value of protein was verified. The results showed that the quality of rice protein was significantly different among different bases and varieties ( $P < 0.05$ ). The correlation coefficient  $r$  of the weighted grey correlation method with PER and NPR was 0.959 ( $P = 0.003$ ) and 0.974 ( $P = 0.001$ ) respectively. The results demonstrate that the weighted grey correlation degree is highly correlated with biological indexes of protein quality, which can characterize the nutritional quality of rice protein scientifically and effectively.

**Keywords:** amino acid; protein nutrition evaluation; improved analytic hierarchy process; grey correlation analysis

稻米是中国的主要粮食作物, 是人类蛋白和能量的重要来源之一<sup>[1]</sup>, 稻米蛋白质的生物价和氨基酸构成比例远优于其他谷物蛋白<sup>[2-3]</sup>。近年来, 随着中国居民消费水平的不断提高和消费质量的明显改善, 人们对主食稻米的需求也由原来的数量型向质量型、健康型、食味型和功能型转变<sup>[4]</sup>。目前, 蛋白质营养学评价方法可概括为生物学评价法和氨基酸分析评价法两大类<sup>[5]</sup>, 生物学评价法主要包括蛋白质生物价 (BV)、蛋白质功效比值 (PER)、净蛋白比值 (NPR) 和氮平衡指数 (NBI) 等<sup>[6-7]</sup>; 氨基酸分析评价法主要包括氨基酸评分 (AAS)<sup>[8]</sup>、蛋白质消化率校正的氨基酸评分 (PDCAAS)、必需氨基酸指数 (EAAI)<sup>[9-10]</sup>、氨基酸比值系数 (RC)、氨基酸比值系数分 (SRC) 等<sup>[11-12]</sup>。生物学评价法是蛋白质营养学评价的经典方法, 常用作标准方法来验证其他评价方法的可靠性<sup>[13]</sup>, 但该方法的评价指标必须通过动物或人体试验获得, 存在试验周期长、成本高、步骤繁琐等难以解决的问题<sup>[14]</sup>; 氨基酸分析评价法的 AAS 只能反映某种蛋白质与理想蛋白质相比, 第一限制性氨基酸的缺乏程度; PDCAAS 以蛋白质消化相关系数对某种食物蛋白质进行

**基金项目:**湖南省重点研发计划项目 (编号: 2016NK2181); 湖南省农业科技创新资金项目 (编号: 2019JG01-12)

**作者简介:**肖轲, 男, 湖南省农产品加工研究所助理研究员, 硕士。  
**通信作者:**李志坚 (1977—), 男, 湖南省农产品加工研究所副研究员, 硕士。E-mail: 498167997@qq.com

**收稿日期:**2019-08-03

校正,相比未校正的氨基酸评分有了一定的改进,但同样是基于第一限制性氨基酸来决定蛋白质的最终得分,对某些必需氨基酸缺乏或者严重不足的蛋白质,其评价结果与生物学评价结果有很大的差异<sup>[6,15]</sup>;SRC、EAAI、RC 则仅从数理统计学的角度评估不同蛋白质与理想蛋白质必需氨基酸组成的差异程度,并未体现第一限制性氨基酸对食物蛋白质营养价值的限制作用<sup>[16-17]</sup>,因此如何快速有效地对食物蛋白质的质量作出全面、客观、科学的评价越来越受到学术界的关注。

目前,关于稻米的食味品质和感官评价已有大量文献<sup>[18-20]</sup>报道,而关于不同稻米蛋白质营养品质评价方面尚未见报道。试验拟采用改进层次分析法和加权灰色关联度分析相结合的方法,引入加权关联度的概念,赋予各评价指标不同的权重<sup>[21]</sup>,强化限制性氨基酸的重要性,对不同品种及不同产地的 24 个稻米进行加权综合评价,为稻米的营养品质评价、婴幼儿营养米粉及其他深加工产品研发提供支撑依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

稻米:2018 年采集于桃源县兴隆米业 3 个不同生产基地 8 个不同晚粳品种共 24 份,样品均为正常成熟期后收割,经自然晒干后制成精米,粉碎过 80 目筛;

17 种氨基酸混合溶液标准物质:国家标准物质中心;化学试剂均为国产分析纯。

### 1.2 试验仪器

全自动氨基酸分析仪:L-8900 型,日本日立公司;

全自动凯氏定氮仪:KJELTEC 2300 型,丹麦 FOSS 公司;

组织粉碎机:XL-06A 型,长沙旭众机械设备有限公司;

电子分析天平:ME204 型,上海恒勤仪器设备有限公司。

### 1.3 指标测定

1.3.1 蛋白质含量 按 GB 5009.5—2016 执行。

1.3.2 氨基酸组成与含量 除色氨酸外的 17 种水解氨基酸含量的测定均参照 GB 5009.124—2016。

### 1.4 蛋白质营养学评价

1.4.1 权重的赋予 采用改进 AHP 法(3 标度法)对各评价指标进行两两比较,根据评价指标的重要程度建立判断矩阵,参考王民敬等<sup>[22]</sup>的方法计算出各指标的权重并进行一致性检验,依据强化限制性氨基酸的重要性判断矩阵  $b_{ij}$ 。

$$b_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{元素 } j \text{ 比 } i \text{ 重要时} \\ 1 & \text{元素 } i \text{ 与 } j \text{ 同等重要时,} \\ 2 & \text{元素 } i \text{ 比 } j \text{ 重要时} \end{cases} \quad (1)$$

1.4.2 评价指标的筛选 选择稻米中 8 种人体必需氨基酸(色氨酸未测)以及条件必需氨基酸酪氨酸和半胱氨酸为评价因子。

### 1.4.3 灰色关联度分析

(1) 构建理想蛋白:根据灰色分析法原理,将参试的 24 份稻米样品看作一个灰色系统,每份样品为该系统的一个因素,以稻米必需氨基酸特征指标构建比较序列,记为  $X_i(k) (i=1,2,3,\dots,24; k=1,2,3,\dots,8)$ 。以 FAO/WHO(2007)推荐的 1 岁以下婴幼儿氨基酸评分模式为参考序列<sup>[23]</sup>,记为  $X_0$ 。

(2) 数据的无量纲化处理:采用初值化法,用所有  $X_i (i=1,2,3,\dots,24; k=1,2,3,\dots,8)$  相应的必需氨基酸值除以  $X_0$  相对应的必需氨基酸值,得各必需氨基酸相对含量。

(3) 关联度的计算:按式(2)计算关联系数。

$$\zeta_i(k) = \frac{\min \Delta_i(k) + \rho \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max \Delta_i(k)}, \quad (2)$$

式中:

$\min \Delta_i(k)$ 、 $\max \Delta_i(k)$  ——所有比较序列中绝对差值的最小值和最大值;

$\Delta_i(k)$  ——第  $i$  个比较序列的绝对差值;

$\zeta_i(k)$  ——关联系数;

$\rho$  ——分辨系数,  $0 < \rho < 1$ 。

(4) 加权关联度的计算:按式(3)计算各供试样品的加权关联度。

$$\gamma_i' = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \omega_i \zeta_i(k), \quad (3)$$

式中:

$\gamma_i'$  ——加权关联度;

$\omega_i$  ——指标权重;

$\zeta_i(k)$  ——关联系数。

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 软件进行统计分析,所有测定均进行 3 次平行试验,结果以平均值表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻米蛋白质及氨基酸组成分析

由表 1、2 可知,24 份不同稻米样品蛋白质含量为 8.62%~12.92%,氨基酸总量为 7.94%~11.87%,必需氨基酸质量分数为 3.13%~4.61%,其中  $X_{17}$  氨基酸总量、必需氨基酸总量均为最高, $X_{12}$  均为最低。氨基酸平衡理论认为食物蛋白的氨基酸组成比例与 WHO/FAO 模式越接近越有利于人体的吸收与健康,其蛋白质品质越高<sup>[24]</sup>。按 FAO/WHO(2007)不同人群氨基酸评分模式,并给合表 1、2 可知,EAA/TAA 比值为 38.4%~39.8%,EAA/NEAA 比值为 62.3%~66.1%,均接近或高于 FAO/WHO 提出的理想蛋白衡量值(40%,60%),说明

表 1 24 份样品蛋白质、氨基酸组成及其含量<sup>†</sup>  
Table 1 Amino acid composition and content in rice g/100 g

| 品种              | 蛋白质   | Asp   | Ser   | Glu   | Gly   | Ala   | Arg   | Pro  | Cys * * | Tyr * * | His *    | Val * |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---------|---------|----------|-------|
| X <sub>1</sub>  | 9.89  | 0.89  | 0.47  | 1.76  | 0.43  | 0.55  | 0.66  | 0.48 | 0.077   | 0.16    | 0.26     | 0.49  |
| X <sub>2</sub>  | 9.97  | 0.91  | 0.48  | 1.81  | 0.44  | 0.56  | 0.63  | 0.49 | 0.080   | 0.15    | 0.24     | 0.50  |
| X <sub>3</sub>  | 11.29 | 1.03  | 0.55  | 2.04  | 0.50  | 0.63  | 0.78  | 0.55 | 0.100   | 0.21    | 0.27     | 0.56  |
| X <sub>4</sub>  | 9.29  | 0.84  | 0.45  | 1.66  | 0.41  | 0.52  | 0.61  | 0.45 | 0.082   | 0.17    | 0.23     | 0.46  |
| X <sub>5</sub>  | 9.78  | 0.89  | 0.47  | 1.75  | 0.43  | 0.55  | 0.66  | 0.47 | 0.083   | 0.17    | 0.24     | 0.49  |
| X <sub>6</sub>  | 9.57  | 0.87  | 0.46  | 1.70  | 0.43  | 0.54  | 0.63  | 0.47 | 0.094   | 0.18    | 0.24     | 0.48  |
| X <sub>7</sub>  | 9.37  | 0.85  | 0.45  | 1.66  | 0.42  | 0.53  | 0.62  | 0.47 | 0.079   | 0.13    | 0.26     | 0.47  |
| X <sub>8</sub>  | 10.84 | 0.99  | 0.52  | 1.90  | 0.48  | 0.61  | 0.77  | 0.51 | 0.110   | 0.21    | 0.30     | 0.54  |
| X <sub>9</sub>  | 10.85 | 0.98  | 0.52  | 1.93  | 0.47  | 0.60  | 0.79  | 0.52 | 0.100   | 0.24    | 0.26     | 0.53  |
| X <sub>10</sub> | 10.58 | 0.96  | 0.50  | 1.88  | 0.46  | 0.59  | 0.74  | 0.50 | 0.091   | 0.19    | 0.29     | 0.53  |
| X <sub>11</sub> | 10.65 | 0.97  | 0.51  | 1.92  | 0.47  | 0.60  | 0.71  | 0.49 | 0.092   | 0.20    | 0.26     | 0.53  |
| X <sub>12</sub> | 8.62  | 0.79  | 0.41  | 1.53  | 0.39  | 0.49  | 0.56  | 0.42 | 0.074   | 0.16    | 0.21     | 0.43  |
| X <sub>13</sub> | 11.62 | 1.05  | 0.55  | 2.07  | 0.50  | 0.64  | 0.79  | 0.54 | 0.110   | 0.25    | 0.28     | 0.58  |
| X <sub>14</sub> | 10.52 | 0.95  | 0.50  | 1.88  | 0.46  | 0.58  | 0.74  | 0.50 | 0.093   | 0.21    | 0.25     | 0.52  |
| X <sub>15</sub> | 10.12 | 0.91  | 0.49  | 1.83  | 0.44  | 0.56  | 0.67  | 0.49 | 0.084   | 0.17    | 0.25     | 0.50  |
| X <sub>16</sub> | 12.16 | 1.08  | 0.58  | 2.13  | 0.54  | 0.69  | 0.85  | 0.57 | 0.099   | 0.26    | 0.29     | 0.62  |
| X <sub>17</sub> | 12.92 | 1.18  | 0.60  | 2.24  | 0.56  | 0.71  | 0.94  | 0.62 | 0.120   | 0.28    | 0.34     | 0.63  |
| X <sub>18</sub> | 11.95 | 1.08  | 0.58  | 2.06  | 0.52  | 0.68  | 0.85  | 0.58 | 0.093   | 0.22    | 0.29     | 0.61  |
| X <sub>19</sub> | 10.47 | 0.95  | 0.51  | 1.89  | 0.47  | 0.60  | 0.71  | 0.50 | 0.083   | 0.19    | 0.25     | 0.54  |
| X <sub>20</sub> | 10.69 | 0.97  | 0.51  | 1.91  | 0.47  | 0.60  | 0.75  | 0.49 | 0.089   | 0.21    | 0.26     | 0.54  |
| X <sub>21</sub> | 10.24 | 0.94  | 0.48  | 1.80  | 0.45  | 0.57  | 0.74  | 0.50 | 0.087   | 0.21    | 0.25     | 0.51  |
| X <sub>22</sub> | 10.82 | 1.00  | 0.53  | 1.98  | 0.48  | 0.61  | 0.75  | 0.39 | 0.096   | 0.19    | 0.26     | 0.55  |
| X <sub>23</sub> | 12.05 | 1.09  | 0.58  | 2.19  | 0.52  | 0.67  | 0.83  | 0.59 | 0.110   | 0.24    | 0.29     | 0.60  |
| X <sub>24</sub> | 11.62 | 1.06  | 0.56  | 2.10  | 0.50  | 0.65  | 0.79  | 0.55 | 0.096   | 0.23    | 0.28     | 0.58  |
| 品种              | Met * | Ile * | Leu * | Phe * | Lys * | Thr * | TAA   | EAA  | NEAA    | EAA/TAA | EAA/NEAA |       |
| X <sub>1</sub>  | 0.16  | 0.42  | 1.03  | 0.53  | 0.40  | 0.35  | 9.11  | 3.63 | 5.49    | 39.8    | 66.1     |       |
| X <sub>2</sub>  | 0.16  | 0.43  | 1.06  | 0.48  | 0.40  | 0.36  | 9.18  | 3.63 | 5.55    | 39.5    | 65.3     |       |
| X <sub>3</sub>  | 0.18  | 0.48  | 1.18  | 0.53  | 0.45  | 0.40  | 10.44 | 4.05 | 6.39    | 38.8    | 63.4     |       |
| X <sub>4</sub>  | 0.16  | 0.40  | 0.97  | 0.43  | 0.38  | 0.34  | 8.55  | 3.36 | 5.20    | 39.2    | 64.5     |       |
| X <sub>5</sub>  | 0.16  | 0.42  | 1.02  | 0.46  | 0.40  | 0.35  | 9.01  | 3.53 | 5.48    | 39.2    | 64.5     |       |
| X <sub>6</sub>  | 0.17  | 0.41  | 0.98  | 0.42  | 0.40  | 0.35  | 8.81  | 3.44 | 5.37    | 39.0    | 64.0     |       |
| X <sub>7</sub>  | 0.15  | 0.40  | 0.97  | 0.44  | 0.40  | 0.34  | 8.63  | 3.42 | 5.21    | 39.6    | 65.6     |       |
| X <sub>8</sub>  | 0.16  | 0.46  | 1.11  | 0.50  | 0.45  | 0.39  | 9.98  | 3.90 | 6.08    | 39.1    | 64.1     |       |
| X <sub>9</sub>  | 0.17  | 0.45  | 1.12  | 0.49  | 0.43  | 0.38  | 9.99  | 3.84 | 6.16    | 38.4    | 62.3     |       |
| X <sub>10</sub> | 0.17  | 0.46  | 1.10  | 0.47  | 0.43  | 0.37  | 9.74  | 3.82 | 5.93    | 39.2    | 64.4     |       |
| X <sub>11</sub> | 0.17  | 0.46  | 1.12  | 0.51  | 0.42  | 0.38  | 9.81  | 3.85 | 5.96    | 39.2    | 64.5     |       |
| X <sub>12</sub> | 0.14  | 0.38  | 0.90  | 0.39  | 0.36  | 0.31  | 7.94  | 3.13 | 4.81    | 39.4    | 65.1     |       |
| X <sub>13</sub> | 0.17  | 0.50  | 1.21  | 0.54  | 0.45  | 0.41  | 10.65 | 4.15 | 6.50    | 39.0    | 63.8     |       |
| X <sub>14</sub> | 0.16  | 0.46  | 1.11  | 0.49  | 0.41  | 0.37  | 9.69  | 3.77 | 5.91    | 38.9    | 63.8     |       |
| X <sub>15</sub> | 0.16  | 0.44  | 1.07  | 0.48  | 0.40  | 0.36  | 9.32  | 3.66 | 5.66    | 39.3    | 64.7     |       |
| X <sub>16</sub> | 0.14  | 0.49  | 1.22  | 0.72  | 0.48  | 0.42  | 11.20 | 4.39 | 6.81    | 39.2    | 64.5     |       |
| X <sub>17</sub> | 0.17  | 0.54  | 1.32  | 0.62  | 0.53  | 0.45  | 11.87 | 4.61 | 7.26    | 38.8    | 63.5     |       |
| X <sub>18</sub> | 0.16  | 0.52  | 1.27  | 0.58  | 0.46  | 0.42  | 10.99 | 4.32 | 6.68    | 39.3    | 64.7     |       |
| X <sub>19</sub> | 0.13  | 0.44  | 1.08  | 0.50  | 0.42  | 0.37  | 9.64  | 3.73 | 5.92    | 38.6    | 63.0     |       |
| X <sub>20</sub> | 0.16  | 0.46  | 1.12  | 0.50  | 0.43  | 0.38  | 9.84  | 3.84 | 6.00    | 39.1    | 64.1     |       |
| X <sub>21</sub> | 0.15  | 0.44  | 1.07  | 0.47  | 0.41  | 0.36  | 9.43  | 3.65 | 5.78    | 38.7    | 63.2     |       |
| X <sub>22</sub> | 0.16  | 0.47  | 1.15  | 0.52  | 0.43  | 0.39  | 9.96  | 3.94 | 6.02    | 39.5    | 65.4     |       |
| X <sub>23</sub> | 0.17  | 0.52  | 1.28  | 0.59  | 0.46  | 0.42  | 11.14 | 4.32 | 6.82    | 38.8    | 63.4     |       |
| X <sub>24</sub> | 0.15  | 0.50  | 1.23  | 0.56  | 0.45  | 0.40  | 10.69 | 4.15 | 6.54    | 38.8    | 63.5     |       |

<sup>†</sup> TAA. 氨基酸总量;EAA. 必需氨基酸总量;NEAA. 非必需氨基酸总量;“\*”半必需氨基酸;“\* \*”必需氨基酸。

表 2 FAO/WHO 氨基酸评分模式与稻米必需氨基酸比较<sup>†</sup>

Table 2 Comparison between FAO/WHO amino acid scoring model and essential amino acid analysis in rice  
mg/g · Pro

| 品种              | His  | Ile  | Leu   | Lys  | Cys+Met | Tyr+Phe | Thr  | Val  | EAA   |
|-----------------|------|------|-------|------|---------|---------|------|------|-------|
| X <sub>1</sub>  | 25.9 | 42.7 | 104.1 | 40.0 | 23.7    | 69.3    | 35.5 | 49.3 | 390.4 |
| X <sub>2</sub>  | 24.4 | 43.2 | 106.3 | 40.2 | 24.4    | 62.7    | 35.8 | 50.2 | 387.1 |
| X <sub>3</sub>  | 24.3 | 42.7 | 104.4 | 39.7 | 24.6    | 65.4    | 35.5 | 49.8 | 386.4 |
| X <sub>4</sub>  | 24.3 | 43.0 | 104.0 | 41.2 | 25.5    | 64.1    | 36.1 | 50.0 | 388.1 |
| X <sub>5</sub>  | 24.3 | 42.6 | 104.3 | 41.0 | 25.1    | 64.4    | 36.0 | 49.8 | 387.5 |
| X <sub>6</sub>  | 24.9 | 42.5 | 102.4 | 41.8 | 27.2    | 62.5    | 36.8 | 49.7 | 387.8 |
| X <sub>7</sub>  | 27.3 | 43.2 | 103.7 | 42.5 | 24.0    | 60.4    | 36.1 | 50.0 | 387.2 |
| X <sub>8</sub>  | 27.6 | 42.4 | 102.8 | 41.6 | 24.7    | 65.8    | 35.8 | 49.7 | 390.5 |
| X <sub>9</sub>  | 24.2 | 41.9 | 103.7 | 39.5 | 24.7    | 67.8    | 35.4 | 49.4 | 386.6 |
| X <sub>10</sub> | 27.0 | 43.0 | 103.8 | 40.9 | 24.3    | 62.6    | 35.1 | 49.8 | 386.4 |
| X <sub>11</sub> | 23.8 | 43.2 | 104.7 | 39.4 | 24.3    | 66.3    | 35.2 | 50.0 | 386.9 |
| X <sub>12</sub> | 24.4 | 43.9 | 104.9 | 41.8 | 25.2    | 63.2    | 36.4 | 50.4 | 390.1 |
| X <sub>13</sub> | 24.3 | 43.1 | 104.3 | 39.2 | 24.7    | 68.5    | 35.4 | 50.2 | 389.6 |
| X <sub>14</sub> | 24.1 | 43.3 | 105.7 | 39.1 | 24.2    | 67.1    | 35.0 | 50.0 | 388.4 |
| X <sub>15</sub> | 24.4 | 43.6 | 105.9 | 39.8 | 23.9    | 64.7    | 35.8 | 50.0 | 388.0 |
| X <sub>16</sub> | 23.5 | 40.4 | 100.0 | 39.5 | 19.3    | 80.4    | 34.7 | 51.0 | 388.8 |
| X <sub>17</sub> | 26.5 | 42.1 | 102.3 | 41.0 | 22.3    | 69.6    | 34.7 | 49.2 | 387.7 |
| X <sub>18</sub> | 24.0 | 43.5 | 106.7 | 38.9 | 21.7    | 67.1    | 35.6 | 51.1 | 388.7 |
| X <sub>19</sub> | 24.0 | 41.6 | 102.9 | 39.6 | 20.5    | 66.6    | 35.3 | 51.1 | 381.6 |
| X <sub>20</sub> | 24.0 | 43.2 | 104.7 | 40.1 | 23.2    | 66.3    | 35.4 | 50.3 | 387.1 |
| X <sub>21</sub> | 24.1 | 43.1 | 104.9 | 40.2 | 23.1    | 66.9    | 35.4 | 49.9 | 387.7 |
| X <sub>22</sub> | 24.4 | 44.0 | 106.5 | 39.8 | 24.0    | 66.1    | 35.9 | 50.7 | 391.5 |
| X <sub>23</sub> | 23.8 | 42.8 | 105.8 | 37.9 | 22.6    | 68.3    | 35.0 | 49.5 | 385.5 |
| X <sub>24</sub> | 24.0 | 43.1 | 106.0 | 38.5 | 21.2    | 68.1    | 34.9 | 49.8 | 385.6 |
| FAO/WHO         | 26.0 | 46.0 | 93.0  | 66.0 | 42.0    | 72.0    | 43.0 | 55.0 | 443.0 |

<sup>†</sup> EAA. 必需氨基酸总量。

供试稻米蛋白质是一种较为优良的营养蛋白。但与 FAO/WHO(2007)推荐的 1 岁以下婴儿氨基酸模式相比,24 份供试样品除 Leu 达到或略高于标准模式外,其余必需氨基酸及必需氨基酸总量均低于 FAO/WHO(2007)推荐模式,其中严重缺乏 Cys+Met,为第一限制性氨基酸。因此,在以稻米作为主要原料研发婴幼儿营养米粉、特殊膳食食品及其他精深加工产品时,除选择营养品质较高的稻米原料外,可考虑添加与理想氨基酸模式互补的原料或游离氨基酸以达到提高产品营养价值的目的。

2.2 灰色关联度分析

2.2.1 各评价指标权重的确定 根据改进 AHP 法原理,建立判断矩阵,求出各必需氨基酸权重,即第一限制性氨基酸  $\omega_1=0.234$ ,其余 7 种必需氨基酸  $\omega_i(i=2,3,4,\cdots,8)=0.109$ 。对判断矩阵进行一致性检验, $CR=0.0012<0.1$ ,表明构造的判断矩阵能够通过一次检验,满足 AHP

分析法的要求。

2.2.2 加权关联度计算 试验中  $\min\triangle_i(k)=0.0046$ ,  $\max\triangle_i(k)=0.5414$ ,  $p=0.5$ ,关联度越大,表明该样品与参考蛋白相似度越高。由表 3 可知,各参试样品综合得分最高为 X<sub>1</sub>(关联度 0.655),其次为 X<sub>17</sub>(关联度 0.645)和 X<sub>6</sub>(关联度 0.642),综合得分越高表明样品氨基酸组成平衡度越好,吸收利用率越高,与理想氨基酸模式越吻合。

2.3 加权灰色关联度法与生物学法的相关性

试验采用 Mensa 等<sup>[25]</sup>的方法对加权灰色关联度评价法进行可行性验证,原始数据及验证结果分别见表 4、5。由表 5 可知,4 种氨基酸评价法与生物学法(PER、NPR)的相关性顺序为加权灰色关联度法>SRC>1-IBD>PDCAAS,其中 PDCAAS 与生物学法呈负相关性,SRC、1-IBD 与生物学法的相关性均较低,相关系数分别为 0.480,0.675和 0.471,0.668;而加权灰色关联度法与生物

表 3 各试验品种的关联系数及加权关联度

Table 3 Correlation coefficient and weighted correlation degree of each test variety

| 品种              | His   | Ile   | Leu   | Lys   | Cys+Met | Tyr+Phe | Thr   | Val   | 加权关联度 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|
| X <sub>1</sub>  | 1.000 | 0.802 | 0.706 | 0.415 | 0.389   | 0.892   | 0.618 | 0.737 | 0.655 |
| X <sub>17</sub> | 0.947 | 0.774 | 0.743 | 0.424 | 0.372   | 0.906   | 0.595 | 0.733 | 0.645 |
| X <sub>6</sub>  | 0.876 | 0.795 | 0.741 | 0.432 | 0.441   | 0.683   | 0.663 | 0.752 | 0.642 |
| X <sub>13</sub> | 0.820 | 0.825 | 0.701 | 0.407 | 0.403   | 0.860   | 0.616 | 0.768 | 0.639 |
| X <sub>22</sub> | 0.832 | 0.875 | 0.662 | 0.412 | 0.393   | 0.781   | 0.633 | 0.791 | 0.636 |
| X <sub>12</sub> | 0.825 | 0.867 | 0.690 | 0.432 | 0.410   | 0.701   | 0.650 | 0.775 | 0.634 |
| X <sub>8</sub>  | 0.830 | 0.790 | 0.733 | 0.430 | 0.404   | 0.772   | 0.629 | 0.751 | 0.632 |
| X <sub>4</sub>  | 0.822 | 0.817 | 0.708 | 0.426 | 0.415   | 0.722   | 0.637 | 0.759 | 0.630 |
| X <sub>9</sub>  | 0.807 | 0.767 | 0.714 | 0.410 | 0.404   | 0.836   | 0.614 | 0.737 | 0.627 |
| X <sub>5</sub>  | 0.823 | 0.801 | 0.701 | 0.424 | 0.408   | 0.732   | 0.635 | 0.754 | 0.626 |
| X <sub>10</sub> | 0.892 | 0.821 | 0.712 | 0.422 | 0.397   | 0.687   | 0.605 | 0.754 | 0.626 |
| X <sub>14</sub> | 0.801 | 0.838 | 0.675 | 0.405 | 0.396   | 0.811   | 0.601 | 0.761 | 0.626 |
| X <sub>21</sub> | 0.803 | 0.827 | 0.690 | 0.416 | 0.383   | 0.805   | 0.615 | 0.758 | 0.625 |
| X <sub>18</sub> | 0.795 | 0.849 | 0.659 | 0.404 | 0.365   | 0.814   | 0.623 | 0.805 | 0.625 |
| X <sub>15</sub> | 0.825 | 0.850 | 0.672 | 0.412 | 0.392   | 0.738   | 0.630 | 0.761 | 0.625 |
| X <sub>20</sub> | 0.794 | 0.829 | 0.694 | 0.415 | 0.383   | 0.786   | 0.616 | 0.772 | 0.624 |
| X <sub>3</sub>  | 0.814 | 0.806 | 0.699 | 0.411 | 0.402   | 0.760   | 0.618 | 0.754 | 0.624 |
| X <sub>11</sub> | 0.777 | 0.829 | 0.694 | 0.409 | 0.398   | 0.786   | 0.610 | 0.761 | 0.624 |
| X <sub>7</sub>  | 0.856 | 0.831 | 0.714 | 0.439 | 0.394   | 0.638   | 0.637 | 0.759 | 0.623 |
| X <sub>2</sub>  | 0.826 | 0.832 | 0.665 | 0.416 | 0.399   | 0.688   | 0.629 | 0.767 | 0.619 |
| X <sub>24</sub> | 0.789 | 0.825 | 0.670 | 0.400 | 0.360   | 0.847   | 0.600 | 0.755 | 0.617 |
| X <sub>23</sub> | 0.775 | 0.810 | 0.674 | 0.395 | 0.375   | 0.853   | 0.601 | 0.743 | 0.617 |
| X <sub>19</sub> | 0.792 | 0.752 | 0.731 | 0.411 | 0.352   | 0.795   | 0.613 | 0.804 | 0.616 |
| X <sub>16</sub> | 0.752 | 0.702 | 0.796 | 0.410 | 0.339   | 0.710   | 0.593 | 0.801 | 0.599 |

表 4 挤压膨化谷类/豆类混合物的 PER、NPR 和各项化学指数<sup>†</sup>

Table 4 PER, NPR and various chemical indices of extruded puffed cereals/bean mixtures

| 样品     | PER   | NPR    | PDCAAS | SRC    | 1-IBD | 加权灰色关联度法 <sup>*</sup> |
|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-----------------------|
| 混合谷物 1 | 2.400 | 94.300 | 0.437  | 64.646 | 0.754 | 0.523                 |
| 混合谷物 2 | 2.300 | 91.400 | 0.496  | 68.268 | 0.779 | 0.506                 |
| 混合谷物 3 | 2.300 | 94.300 | 0.484  | 69.279 | 0.786 | 0.518                 |
| 混合谷物 4 | 2.200 | 88.600 | 0.504  | 65.413 | 0.760 | 0.495                 |
| 混合谷物 5 | 2.200 | 85.700 | 0.468  | 64.141 | 0.751 | 0.491                 |
| 混合谷物 6 | 2.100 | 85.700 | 0.465  | 63.282 | 0.745 | 0.482                 |

† \* 根据混合谷物各氨基酸含量的不同方法计算所得。

表 5 氨基酸分析评价法与 PER、NPR 的相关性<sup>†</sup>

Table 5 The results of correlation analysis among PER, NPR and amino acid analysis

| 评价方法     | PER                 | NPR                 | PDCAAS | SRC                 | 1-IBD | 加权灰色关联度法 |
|----------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|-------|----------|
| PER      | 1.000               |                     |        |                     |       |          |
| NPR      | 0.899 <sup>*</sup>  | 1.000               |        |                     |       |          |
| PDCAAS   | -0.298              | -0.131              | 1.000  |                     |       |          |
| SRC      | 0.480               | 0.675               | 0.523  | 1.000               |       |          |
| 1-IBD    | 0.471               | 0.668               | 0.535  | 1.000 <sup>**</sup> | 1.000 |          |
| 加权灰色关联度法 | 0.959 <sup>**</sup> | 0.974 <sup>**</sup> | -0.256 | 0.586               | 0.578 | 1.000    |

† \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。



学法呈显著正相关,相关系数分别为 0.959( $P=0.003$ ), 0.974( $P=0.001$ ),验证结果表明,对食物氨基酸与理想蛋白参考模式进行加权灰色关联度分析可以比较科学、客观地反映出食物蛋白质的营养学价值或相似程度,能够在一定程度上表征生物学法对食物蛋白质的评价。

### 3 结论

对采集的 3 个生产基地 8 个晚粳品种 24 份稻米样品的蛋白质含量、氨基酸种类和组成进行了测定,描述性分析结果显示:24 份稻米样品蛋白质含量丰富,氨基酸种类齐全,蛋白质含量为 10.66%,氨基酸总量为 9.82%,必需氨基酸总量为 3.84%,但不同稻米间蛋白质含量、氨基酸总量及必需氨基酸组成均存在显著性差异( $P<0.05$ );采用改进层次分析法对各评价指标赋予不同的权重,并在此基础上,对稻米蛋白质营养价值建立加权灰色关联度综合评价模型,通过对 4 种氨基酸分析法与生物学相关性验证,结果表明:加权关联度评价法与 PER、NPR 呈高度正相关,相关系数分别为 0.959( $P=0.003$ ),0.974( $P=0.001$ ),而其他 3 种氨基酸分析法相关系数均低于 0.8。由此可见,加权灰色关联度综合评价法系统地综合了各种必需氨基酸对蛋白质营养价值的影响,既弥补了生物学评价法试验繁杂、数据采集周期长的局限性,又克服了其他氨基酸评价法对必需氨基酸“不足”或“过剩”所带来的不予考虑的片面性影响,能够较为全面地反映蛋白质利用的生物学效应,可对稻米蛋白质营养质量进行较为科学、客观和有效地定量评价。

试验提出的加权灰色关联度评价法仅基于蛋白质氨基酸总量及其构成比例的基础上建立蛋白质营养价值评价模型,后续可对稻米蛋白质的吸收利用率、不同氨基酸的有效性、氨基酸的存在形式及加工方式进行全面系统地分析,同时结合生物学法对评价模型进行改进和完善,进一步提高评价模型的科学性、全面性和有效性。

### 参考文献

- [1] 王康君,葛立立,范苗苗,等. 稻米蛋白质含量及其影响因素的研究进展[J]. 作物杂志, 2011(6): 1-6.
- [2] NISHIZAWA N, KUROSAWA N, KAN M, et al. Protein quality of high-yielding rice and its improvement by supplementation of Lysine and Threonine[J]. Agric Biol Chem, 1990, 54(2): 399-406.
- [3] 任顺成,王素雅. 稻米中的蛋白质分布与营养分析[J]. 中国粮油学报, 2002(6): 35-38.
- [4] 崔晶,张欣. 水稻食味研究[J]. 食品研究与开发, 2008(2): 193.
- [5] 葛可佑. 中国营养科学全书:上册[M]. 北京:人民卫生出版社, 2004: 594-599.
- [6] 莫英杰,张欣然,王苏,等. 国内外婴幼儿食品中蛋白质质量评价方法的对比研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(3): 168-174.
- [7] 厉曙光. 营养与食品卫生学[M]. 上海:复旦大学出版社, 2012: 9-12.
- [8] 庞广昌,陈庆森,胡志和,等. 蛋白质的消化吸收及其功能评述[J]. 食品科学, 2013, 34(9): 375-391.
- [9] 张雪,葛武鹏,郝梦露,等. 不同基料的婴幼儿配方奶粉蛋白质营养评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 257-263.
- [10] 朱圣陶,吴坤. 蛋白质营养价值评价:氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988(2): 187-190.
- [11] 宋晓青,舒森,陈文彬. 婴儿配方乳粉中蛋白质的营养评价及氨基酸分析研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 292-298.
- [12] MOTA C, SANTOS M, MAURO R, et al. Protein content and amino acids profile of pseudocereals [J]. Food Chemistry, 2016, 193: 55-61.
- [13] 雷兴刚,邓君明,麦康森. 灰色关联度分析法评价蛋白质营养价值的可行性探讨[J]. 云南农业大学学报:自然科学版, 2010, 25(4): 545-550.
- [14] PELLETT P L, YOUNG V R. 蛋白质食物的营养评价[M]. 范文洵,李泽英,赵熙和,译. 北京:人民卫生出版社, 1984: 65-104.
- [15] 范丽芳,张列兵,梁爱云. 氨基酸的有效性对于蛋白消化率校正氨基酸评分的影响[J]. 中国乳品工业, 2000(3): 18-22.
- [16] 马璐,林衍铨,应正河,等. 广叶绣球菌菌丝体与子实体蛋白质营养价值评价[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 214-218.
- [17] 吴婷,杨月欣,张立实. 食物的营养学评价方法研究进展[J]. 国外医学:卫生学分册, 2009, 36(2): 97-101.
- [18] 张亚东,陈涛,赵庆勇,等. 稻米食味品质评价方法的建立与应用[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 350-352.
- [19] 方长云,胡贤巧,邵雅芳,等. 基于雷达图分析法初步评价稻米食味品质的研究[J]. 中国稻米, 2017, 23(2): 13-17.
- [20] 杨泽敏,王维金,卢碧林. 灰色关联分析在稻米品质综合评价上的应用[J]. 中国粮油学报, 2003(3): 4-6.
- [21] 邓聚龙. 农业系统灰色理论与方法[M]. 济南:山东科学技术出版社, 1988: 25-85.
- [22] 王民敬,裴海生,孙君社,等. 基于改进层次分析法的灵芝品质安全综合评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 302-308.
- [23] FAO, WHO, UNU. Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a Joint FAO/WHO/UNU expert consultation [J]. WHO Technical Report Series, 2007, 935: 180.
- [24] 李瑞,陆斌,刘云,等. 云南 17 种核桃仁氨基酸组成分析及营养价值评价[J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 80-85.
- [25] MENSA-WILMOT Y M, PHILLIPS R D, HARGROVE J L, et al. Protein quality evaluation of cowpea-based extrusion cooked cereal/legume weaning mixtures[J]. Nutrition Research, 21(6): 849-857.