



甘肃农业大学学报
Journal of Gansu Agricultural University
ISSN 1003-4315, CN 62-1055/S

《甘肃农业大学学报》网络首发论文

题目： 基于 AHP-EWM 评价陕西渭北地区无袋栽培苹果果实品质
作者： 何肖肖，王娇娇，孙鲁龙，韩明明，郭雄雄，梁俊
收稿日期： 2021-11-03
网络首发日期： 2022-07-12
引用格式： 何肖肖，王娇娇，孙鲁龙，韩明明，郭雄雄，梁俊. 基于 AHP-EWM 评价陕西渭北地区无袋栽培苹果果实品质[J/OL]. 甘肃农业大学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20220711.1458.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 AHP-EWM 评价陕西渭北地区无袋栽培苹果果实品质

何肖肖, 王娇娇, 孙鲁龙, 韩明明, 郭雄雄, 梁俊*

(西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]为建立无袋栽培模式下苹果果实品质评价体系。[方法]以 20 个苹果品种为试材, 测定了果实基本品质指标, 利用变异系数法、相关性分析和主成分分析筛选出核心指标, 构建出基于层次分析法 (AHP) 和熵权法 (EWM) 的无袋栽培苹果品种综合评价模型并对 20 个苹果品种进行了综合评价。[结果]结果表明, 果面光洁指数 (v_7)、硬度 (v_9)、花青苷含量 (v_{12})、维生素 C 含量 (v_{13})、固酸比 (v_{15}) 为代表性指标; 构建的无袋栽培苹果果实品质综合评价模型为 Y (综合值) = $0.3556 v_7 + 0.1124 v_9 + 0.2353 v_{12} + 0.1837 v_{13} + 0.1130 v_{15}$; [结论]在无袋栽培模式下, 瑞香红、粉红女士、秦月、秦阳、瑞阳为综合品质较好的品种, 而长富 2 号、玉华早富、烟富 6 号、2001 富士综合评价结果较差, 模型所得结果与陕西渭北地区的生产实际表现一致, 所提方法模型可为该地区无袋栽培苹果果实品质综合评价提供科学依据。

关键词: 苹果品质; 无袋栽培; 层次分析法; 熵权法; 综合评价法

Evaluation of fruit quality of bagless apple in Weibei area of Shanxi province based on AHP-EWM

HE Xiaoxiao, WANG Jiaojiao, SUN Lulong, HAN Mingming, GUO Xiongxiang, LIANG Jun*

(College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: [Objective] In order to establish the evaluation system of apple fruit quality under bagless cultivation mode. [Method] 20 apple varieties were used as test materials, the basic fruit quality indexes were measured, the core indexes were selected using the coefficient of variation method, correlation analysis and principal component analysis, and a comprehensive evaluation model based on hierarchical analysis and entropy weight method was constructed and evaluated for 20 apple varieties. [Results] The results showed that the fruit surface finish index (v_7), hardness (v_9), anthocyanin content (v_{12}), vitamin C content (v_{13}) and solid to acid ratio (v_{15}) were representative indicators; the comprehensive evaluation model for bagless apple fruit quality was Y (comprehensive value) = $0.3556 v_7 + 0.1124 v_9 + 0.2353 v_{12} + 0.1837 v_{13} + 0.1130 v_{15}$; [Conclusion] under the bagless cultivation model, Rui Xiang Hong Pink Lady, Qin Yue, Qin Yang and Rui Yang were the varieties with better overall quality, while Chang Fu 2, Yu Hua Zao Fu, Yan Fu 6 and 2001 Fuji had poorer overall evaluation results, and the results obtained from the model were consistent with the actual performance in production. The results of the model are consistent with the actual production performance in Weibei area of Shanxi Province. The proposed method model can provide a scientific basis for the comprehensive evaluation of fruit quality of bagless apple cultivation in this area.

Keywords: apple quality, backless cultivation, analytic hierarchy process, entropy weight method, comprehensive evaluation method

第一作者: 何肖肖, 硕士研究生。E-mail: 1766701753@qq.com。

*通信作者: 梁俊, 教授, 博士, 研究方向为苹果安全质量和苹果品质改良。E-mail: strongca@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFD1000201), 陕西省重大科技专项 (2020zdzx03-06-02-02), 中央高校基本科研业务费专项 (2452020033)

投稿日期: 2021-11-03

修回日期: 2022-01-22

苹果 (*Malus domestica* Bork.) 是世界四大水果之一, 在中国的栽培面积、总产量均居世界第一^[1]。目前, 我国苹果产业处于转型升级阶段, 劳动力缺乏、生产成本上升等问题越来越突出。套袋栽培越来越不适于我国苹果产业的发展趋势, 其已成为我国苹果产业发展的瓶颈^[2]。采取无袋栽培, 是缓解用工压力, 减少果园投资, 促进苹果产业持续健康发展的有效途径, 是我国苹果产业转型发展的必然趋势^[3-4]。

目前苹果新品种层出不穷, 但苹果栽培品种依然以富士系为主, 如何选择适宜的无袋栽培品种是实现无袋栽培需解决的首要问题。建立无袋栽培品种果实品质综合评价体系, 则是筛选无袋栽培品种的关键。目前关于果实品质综合评价的研究较多, 在葡萄^[5]、猕猴桃^[6]、冰糖橙^[7]、百香果^[8]等植物中已得到广泛应用。主成分分析法 (Principal component analysis, PCA) 是将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法^[9]。匡立学在 ‘富士’ 苹果品质综合评价中, 运用 PCA 将多个指标降维来筛选评价变量^[10]。层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 是一种具有主观性的赋权方法, 存在一定主观性^[11]。刘美迎等先利用 AHP 给评价指标分配权重, 再利用模糊数学理论计算综合评价值和聚类分析筛选出综合品质较好的鲜食葡萄品种^[12]; 姜雪峰等将 AHP 利用在苹果果实品质综合评价中, 并根据感官品质评价对模型进行验证, 进而筛选出综合品质较优的苹果品种^[13]。目前, 苹果在无袋栽培模式下, 如何评价果实综合品质, 还未进行科学系统的研究, 对于某个品种能否适于无套袋栽培也只停留在对果面光洁度和果面着色等感官评价, 缺乏科学合理的评价指标和综合评价方法。

为对无袋栽培苹果品质进行更科学的评价, 本研究以新品种和主栽的富士系苹果品种为试材, 采用变异系数法 (coefficient of variation, CV)、相关性分析法 (Correlation analysis, CA) 和 PCA, 从多个苹果品质指标中筛选关键指标, 根据 AHP 和熵权法 (entropy weight method, EWM) 分别确定核心指标的权重, 再运用综合评价法建立苹果无袋栽培品质评价的数学模型, 以期筛选出适于无袋栽培的优良苹果品种。该研究可为苹果无袋栽培品质综合评价方法的选择提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

供试品种为西北农林科技大学白水苹果试验站的 20 个苹果品种 (表 1), 所有品种均为矮化栽培、株行距 2m×4m, 砧木为矮化中间砧 M26, 13 年生, 采取无袋栽培、常规管理, 于成熟期 (用淀粉染色法检验成熟度) 采摘。每个品种设置 3 个生物学重复和 5 个技术重复, 随机采 30 个果实测定果实品质。将样品及时用液氮存样置于 -80℃ 冰箱, 用于部分内在品质测定。

表 1 供试品种

Table 1 Tested cultivars

编号	品种名称	采摘日期	编号	品种名称	采摘日期
Serial number	Variety name	Picking date	Serial number	Variety name	Picking date
1	秦阳	7月23日	11	秦冠	10月23日
2	嘎拉	8月15日	12	宫崎短富	10月18日
3	蜜脆	9月2日	13	长富2号	10月21日
4	玉华早富	9月10日	14	烟富6号	10月23日
5	秦月	9月18号	15	陕富6号	10月21日
6	秦韵	9月15日	16	礼泉短富	10月21日
7	瑞阳	10月10日	17	烟富3号	10月21日
8	瑞雪	10月20日	18	秦富1号	10月21日
9	瑞香红	10月25日	19	2001富士	10月21日
10	粉红女士	10月27日	20	岩富10	10月21日

1.2 主要仪器与设备

色差仪(MINOLTA CR-400, 日本); ATAGO 手持数显糖度仪, 苹果酸度计(GMK-835F), 硬度计(GY-1, 中国); HH-4 数显恒温水浴锅, 国华电器有限公司; TGL-20M 高速冷冻离心机, 湖南长沙湘仪离心机仪器有限公司; NS4 紫外可见分光光度计, 上海仪电分析仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 各项指标的测定方法

单果重(g): 电子天平称重并记录(精度0.1g);

果形指数: 用游标卡尺测量纵横径, 果形指数=纵径/横径;

果实密度(g/cm³): 排水法测量, 果实密度=单果重/果实体积;

果面色泽: 采用色差仪测定果皮 L、a、b 值;

果锈指数: 参照李健花等^[14]并稍作修改, 按照果锈面积的苹果总面积的百分比划分: 1级, 果面光滑整洁无任何果锈(果锈面积占0%); 2级, 果面仅有零星果锈(0%<果锈面积≤5%), 并未影响果实商品价值; 3级, 果锈面积逐渐增多(5.1%<果锈面积≤10%), 影响果实商品价值; 4级, 果锈较多甚至覆盖整个果面(10.1%<果锈面积≤100%), 严重影响果实外观品质, 即为没有商品价值的残次果。果锈指数=Σ(各级果数×相应级数)/(总果数×4);

果面光洁指数、果面着色指数: 参照张瑞芳^[6], 并稍作修改。果面着色指数: 分别以果实阳面/阴面和果实胴部为分界线, 将果实划分为4部分: 1级, 果面完全不着色; 2级, 果面着色1%~25%; 3级, 果面着色>25%~50%; 4级, 果面着色>50%~72%; 5级, 果面着色>75%~100%; 果面着色指数=Σ(各级果数×相应级数)/(总果数×5);

可食率(%)：称果实重量后去除果皮、果核，称量果肉重量。可食率=果肉重量/单果重；

可溶性固形物含量(%)：用手持数显糖度仪测定；

可滴定酸含量：用苹果酸度计测定；

固酸比：固酸比=可溶性固形物含量/可滴定酸含量；

果实硬度(kg/cm²)：测量前将待测果实削去适当大小的果皮，用硬度计测量；

维生素C含量(mg/100g)：采用钼蓝比色法测定^[15]；

果皮花青苷含量(mg/100g)：采用紫外分光光度法测定^[16]；

可溶性总糖含量(mg/100g)：采用蒽酮比色法测定^[15]；

糖酸比：糖酸比=可溶性总糖含量/可滴定酸含量。

1.3.2 熵权法(计算过程用python来实现)

熵权法通常使用熵来度量系统的无序程度，在数据分析中，可以通过分析评价指标值的差异性来确定指标的权重，指标值的差异越大，熵值就越小，权重就越大，计算步骤为：

对于 $n \times m$ 维样本数据，构建原始评价指标矩阵： $R = (r_{ij})_{n \times m}$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (1)$$

其中 r_{ij} 是第 i 个评价指标下第 j 个评价指标的值。

(1) 第 i 个评价指标下第 j 个评价指标的权重为：
$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}}$$

(2)

(2) 第 i 个指标的熵值 e_i 为：
$$\begin{cases} e_i = -k \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \\ k = \frac{1}{\ln m} \end{cases}$$

(3)

(3) 第 i 个指标的熵权 w_i 为：
$$W_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n 1 - e_i}$$

(4)

1.4 统计分析

利用 excel 2019 进行数据统计与预处理；SPSS22.0 进行品质性状分析、主成分分析；MATLAB2018a 进行层次分析；python2020 进行相关性热力图绘制、熵权法分析、综合评价法分析。

2 结果与分析

2.1 苹果果实品质描述性分析

20 个苹果品种在无袋栽培条件下果实品质数据差异分析结果见表 2。其中，果形指数、可溶性固形物、可溶性总糖、含水率、果实密度 5 项指标的变异系数分别为 7.19%、9.65%、9.23%、1.56%和 4.21%，均小于 10%，说明无袋栽培条件下这些指标在不同品种之间的差异较小，若作为评价指标不具有代表性；其他指标变异系数均大于 10%，离散程度相对较大，其中花青苷含量变异系数最高为 53.89%，其次是果皮 a 值（46.88%），说明在无袋栽培条件下不同苹果品种间在果皮花青苷含量和果皮 a 值等品质指标之间的差异较大。

表 2 无袋栽培苹果果实品质性状分析

Table 2 Analysis of fruit quality characteristics of unbagged apple

品质指标 Quality index	平均数 Average	最小值 Minimum	最大值 Max	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation (%)
单果重 (g) Single fruit weight (g)	291.43	182.50	394.50	50.98	17.49
果形指数 Fruit Shape Index	0.87	0.76	1.05	0.06	7.19
果皮 L 值 Peel L value	53.96	41.33	71.94	6.89	12.77
果皮 a 值 Peel a value	20.21	-12.19	34.05	9.47	46.88
果皮 b 值 Peel b value	25.39	15.98	46.40	6.20	24.43
果锈指数 Fruit rust index	0.55	0.35	0.77	0.15	28.03
果面光洁指数 Fruit surface finish index	0.59	0.41	0.88	0.15	25.27
果面着色指数 Fruit surface color index	0.60	0.304	0.91	0.16	27.04
硬度 (kg/cm ²) Hardness (kg/cm ²)	7.56	5.96	9.07	0.52	10.85
可溶性固形物含量 (%) Soluble solid content (%)	14.58	10.7	16.6	1.41	9.65
可滴定酸含量 (%) Content of titratable acid	0.36	0.24	0.64	0.08	22.04
果皮花青苷含量 (mg/100g) Peel anthocyanin content (mg/100g)	18.79	0.00	38.76	10.13	53.89
维生素 C 含量 (mg/100g) vitamin C content (mg/100g)	6.90	5.01	8.87	1.02	14.82
可溶性总糖含量 (mg/100g) Soluble sugar content (mg/100g)	13.10	10.42	17.43	1.23	9.38
固酸比	41.89	22.03	60.83	7.98	19.06

Solid-acid ratio					
糖酸比	37.65	19.34	56.48	7.52	19.97
Sugar-acid ratio					
含水率 (%)	0.84	0.815	0.88	0.01	1.56
Moisture content (%)					
果实密度 (g/cm ³)	0.83	0.762	0.897	0.04	4.21
Fruit density (g/cm ³)					

2.2 品质指标相关性分析

对 20 个无袋栽培苹果品种的 18 项品质指标进行相关性分析 (图 1), 结果显示, 单果重与固酸比、糖酸比之间呈极显著正相关, 与花青苷含量呈极显著负相关; 果型指数果皮 a 值、果实着色指数呈显著负相关; 果皮 L 值与果皮 a 值、果实着色指数、花青苷含量之间呈显著相关性; 果皮 a 值与果皮花青苷含量呈极显著正相关, 与果皮 b 值呈极显著负相关;

果实着色指数果面与光洁指数呈极显著正相关、与果锈指数呈极显著负相关; 可滴定酸含量与糖酸比呈极显著负相关, 花青苷含量与含水率、果实密度呈极显著正相关, 可溶性总糖含量与糖酸比呈极显著正相关, 固酸比与糖酸比呈显著正相关。

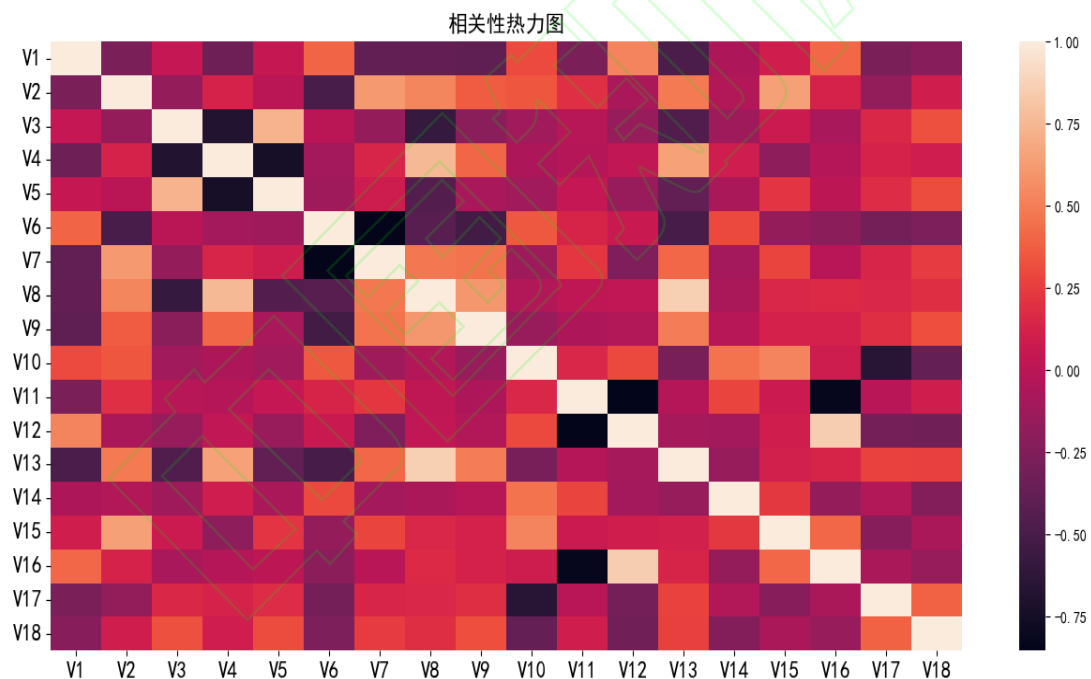


图 1 20 个无袋栽培苹果品种品质指标之间的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of quality indexes of 20 unpacked apple varieties

注: v₁ 单果重 (g)、v₂ 果型指数、v₃ 果皮 L 值、v₄ 果皮 a 值、v₅ 果皮 b 值、v₆ 果锈指数、v₇ 果面光洁指数、v₈ 果面着色指数、v₉ 硬度 (kg/cm²)、v₁₀ 可溶性固形物含量 (%)、v₁₁ 可滴定酸含量 (%)、v₁₂ 果皮花青苷含量 (mg/100g)、v₁₃ 维生素 C 含量 (mg/100g)、v₁₄ 可溶性总糖含量 (mg/100g)、v₁₅ 固酸比、v₁₆ 糖酸比、v₁₇ 含水率 (%)、v₁₈ 果实密度 (g/cm³)

Note: v₁ Single fruit weight (g), v₂ Fruit shape index, v₃ Peel L value, v₄ Peel a value, v₅ Peel b value, v₆ Embroidered index, v₇ Fruit surface smoothness index, v₈ Fruit surface coloration index, v₉ Hardness (kg/cm²), v₁₀ Soluble solids content (%), v₁₁ Content of titratable acid (%), v₁₂ Peel anthocyanin content (mg/100g), v₁₃ Fruit vitamin C content (mg/100g), v₁₄ Soluble sugar content (mg/100g), v₁₅ Solid-acid ratio, v₁₆ Sugar-acid ratio, v₁₇ Moisture content (%), v₁₈ Fruit density (g/cm³).

2.3 苹果品质指标主成分分析结果

对 20 个无袋栽培苹果品种的 18 个品质指标进行主成分分析(表 3), 前 5 个主成分(特征值 >1.0)累加贡献率 80.482%, 表明前 5 个主成分能提取 18 个品质指标的绝大部分信息。第 1 主成分由果面着色指数、果皮花青苷含量、果面光洁指数、果锈指数、单果重、硬度决定, 主要代表果实外观品质因子; 第 2 主成分由固酸比、糖酸比决定, 代表果实风味因子; 第 3 主成分代表果实果皮 b 值信息, 代表果实果皮色泽因子; 第 4 主成分由果形指数、可溶性固形物含量、可溶性总糖含量决定, 主要代表果实内在品质因子。第 5 主成分主由维生素 C 含量决定, 代表果实营养品质因子。

表 3 5 个主成分的特征向量、特征值、贡献率及累积贡献率

Table 3 Eigenvector, eigenvalue, contribution rate and cumulative contribution rate of five principal components

指标 index	主成分 principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
单果重 (g) Single fruit weight (g)	-0.613	0.429	0.171	-0.023	-0.075
果形指数 Fruit Shape Index	0.584	0.170	0.161	0.668	-0.153
果皮 L 值 Peel L value	-0.456	-0.537	0.514	0.151	0.141
果皮 a 值 Peel a value	0.564	0.314	-0.466	-0.337	0.149
果皮 b 值 Peel b value	-0.323	-0.505	0.611	0.309	0.150
果锈指数 Fruit rust index	-0.69	0.119	-0.534	-0.09	0.192
果面光洁指数 Fruit surface finish index	0.700	-0.158	0.262	0.368	-0.234
果面着色指数 Fruit surface color index	0.885	0.300	-0.106	-0.027	0.057
硬度 (kg/cm ²) Hardness (kg/cm ²)	0.703	0.041	0.172	0.019	0.255
可溶性固形物含量 (%) Soluble solid content (%)	-0.267	0.501	-0.275	0.684	0.088
可滴定酸含量 (%) Content of titratable acid	0.111	-0.574	-0.578	0.480	-0.107
果皮花青苷含量 (mg/100g) Peel anthocyanin content (mg/100g)	0.878	0.142	-0.011	-0.134	0.032
维生素 C 含量 (mg/100g) Fruit vitamin C content (mg/100g)	-0.120	0.072	-0.458	0.371	0.676
可溶性总糖含量 (mg/100g) Soluble sugar content (mg/100g)	0.112	0.298	0.281	0.778	0.202
固酸比	-0.231	0.839	0.378	-0.209	0.064

Solid-acid ratio					
糖酸比					
Sugar-acid ratio	0.003	0.726	0.634	-0.092	0.156
含水率 (%)					
Moisture content (%)	0.307	-0.475	0.220	-0.420	0.427
果实密度 (g/cm ³)					
Fruit density (g/cm ³)	0.337	-0.498	0.313	-0.104	0.215
特征值					
Eigenvalues	4.857	3.385	2.695	2.522	1.028
贡献率 (%)					
Contribution rate (%)	26.985	18.804	14.97	14.013	5.711
累计贡献率 (%)					
Cumulative contribution rate (%)	26.985	45.789	60.758	74.771	80.482

2.4 指标选取

为尽可能减少数据之间的重叠性，选取具有代表性的指标，指标选取的原则是根据变异系数、相关性分析和主成分分析综合进行指标选取。

根据变异系数法，指标变异系数小于 10%，不宜作为评价的核心指标^[17]的原则。果形指数、可溶性固形物含量、可溶性总糖含量、含水率、果实密度 5 项指标不考虑作为筛选指标。再结合主成分分析将降维后的指标、相关性分析进行指标选取。

第 1 主成分中选择外观品质因子（果面光洁指数）、色泽因子（果皮花青苷含量）、质地因子（硬度）作为评价指标；第 2 主成分中糖酸比、固酸比是评价果实品质和风味的重要因子，为减少数据冗余，选取固酸比作为评价指标；第 3 主成分中果皮 b 值与果皮花青苷含量呈显著负相关，果皮花青苷代表果实红色度，而果皮 b 值代表果实蓝绿色度，未选择果皮 b 值作为评价指标；第 4 主成分果实果形指数、可溶性固形物含量、可溶性总糖含量，因其变异指数均小于 10%，说明在不同品种中该指标之间的差异较小，不具有代表性，所以未选择这些指标作为评价指标。第 5 主成分维生素 C 含量代表果实营养品质因子、且与其他指标之间的相关性较小，可作为评价指标。综上，本研究选择果面光洁指数、果皮花青苷含量、硬度、固酸比、维生素 C 含量 5 项指标作为无袋栽培果实品质评价核心指标。

利用变异系数法、相关性分析、和主成分分析选出 5 个具有代表性的评价指标后，再次利用相关性分析法验证筛选后各指标数据之间的相关性。结果表明，各指标之间相关性较小（图 2），已有效除去重叠信息，每个指标都具有代表性，可进行下一步层次分析和熵权法确定指标权重。

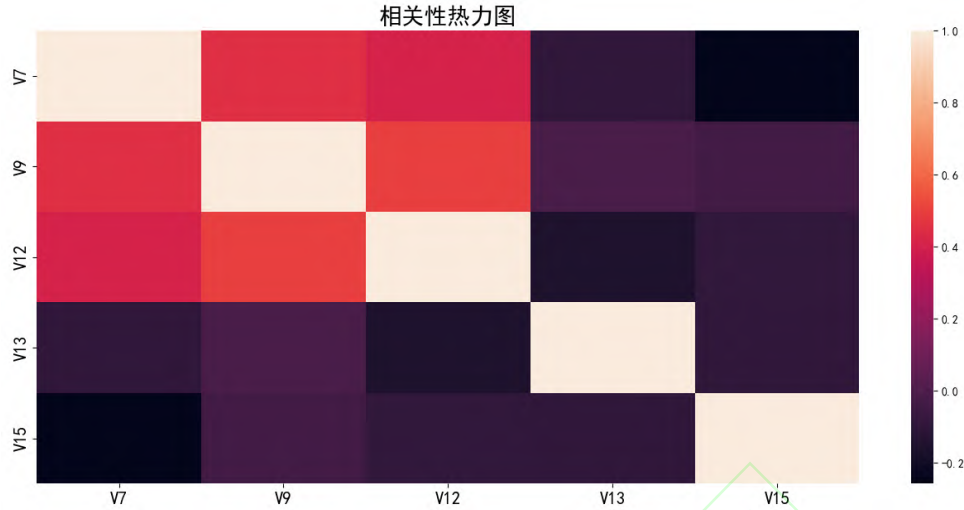


图 2 5 个核心指标相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of five core indicators

注: v7 果面光洁指数、v9 硬度、v12 果皮花青苷含量 (mg/100g)、v13 维生素 C 含量 (mg/100g)、v15 固酸比。

Note: v7 Fruit surface smoothness index, v9 hardness, v12 Peel anthocyanin content (mg/100 g), v13 Fruit vitamin C content (mg/100 g),v15 solid-acid ratio.

2.5 层次分析结果

根据苹果果实品质指标的基本性质与不同指标之间的关系, 运用 1~9 比例标度法建立判断矩阵如表 4。

表 4 MATLAB 分析比较矩阵及一致性检验结果

Table 4 MATLAB analysis comparison matrix and consistency test results

核心指标 Core indicators	v7	v9	v12	v13	v15	Wj	λ_{max}	CI	RI	CR
v7	1	7/3	2	5/3	3/2	0.3011				
v9	3/7	1	3/5	4/3	2/3	0.1291				
v12	1/2	5/3	1	5/2	7/2	0.2855	5.3743	0.0936	1.12	0.0835
v13	3/5	3/4	2/5	1	4/7	0.1120				
v15	2/3	3/2	4/7	7/4	1	0.1723				

检验判断矩阵一致性, 得到 $CI=0.0339$, 根据表 5 知 $n=5$ 时, $RI=1.12$, $CR=CI/RI=0.0835$, $CR<0.1$, 说明判断矩阵具有满意的一致性。得出果面光洁指数、果皮花青苷含量、硬度、维生素 C 含量、固酸比等品质指标的权重 Wj 分别为 0.3011、0.1291、0.1236、0.2855、0.1120 和 0.1723。

表 5 平均随机一致性指标

Table 5 Mean random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

2.6 熵权法分析结果

基于熵权法的因素权重确定，将 20 个苹果品种在无袋栽培条件下的 5 个果实品质评价指标数据标准化后进行权重计算。得出果面光洁指数、果皮花青苷含量、硬度、维生素 C 含量、固酸比等品质指标的权重 W_j 分别为 0.4101、0.1851、0.0957、0.1950、0.1141，各指标得分结果见表 6。

表 6 基于熵权法得出无袋栽培苹果品质评价指标得分

Table 6 Evaluation index score of bagless apple quality based on entropy weight method

品种 Variety	果面光洁指数 Fruit surface smoothness index	硬度 (kg/cm ²) Hardness	花青苷含量(mg/100g) Peel anthocyanin content (mg/100 g)	维生素 C 含量 (mg/100g) Fruit vitamin C content (mg/100 g)	固酸比 solid-acid ratio
秦阳 Qin Yang	0.7679	0.1347	0.3025	0.2738	0.1051
嘎拉 Gala	0.5142	0.0790	0.3265	0.0432	0.0654
蜜脆 Honey crisp	0.3884	0.0474	0.1460	0.2378	0.0063
玉华早富	0.1482	0.1209	0.1710	0.0248	0.0655
秦月 Qin Yue	0.6745	0.1233	0.3254	0.3054	0.1102
秦韵 Qin Yun	0.0395	0.1087	0.2785	0.1506	0.1257
瑞阳 Rui Yang	0.7221	0.1055	0.3065	0.1045	0.2048
瑞雪 Rui Xang	0.8195	0.0955	0.0000	0.2380	0.1067
瑞香红 Rui Xiang hong	0.9331	0.1452	0.3750	0.1510	0.1063
粉红女士 Pink lady	1.0409	0.1745	0.2460	0.2174	0.0414
秦冠 Qin Guan	0.3336	0.0802	0.1604	0.1612	0.1557
宫崎短富 Fuji Miyazaki	0.8456	0.0527	0.0906	0.0682	0.1133
长富 2 号 changfu 2	0.0669	0.0742	0.1097	0.0428	0.1670
烟富 6 号 Yanfu 6	0.0956	0.0390	0.1310	0.2653	0.1257
陕富 6 号 Shanfu 6	0.1621	0.0701	0.1503	0.3593	0.0950
礼泉短富 LiQuan duanfu	0.1805	0.0650	0.1383	0.1481	0.1269
烟富 3 号	0.1657	0.0631	0.1290	0.3645	0.1099

Yanfu 3					
秦富 1 号	0.0157	0.1049	0.1172	0.2721	0.1710
Qinfu 1					
2001 富士	0.1572	0.1171	0.1053	0.1471	0.1517
2001 Fuji					

2.7 综合得分

由层次分析法和熵权法得出各品种得分与排名，再运用综合评价法，最终得出不套袋苹果品质综合评价得分公式为： Y （综合值）= $0.3556 v_7+0.1124 v_9+0.2353 v_{12}+0.1837 v_{13}+0.1130 v_{15}$ 。

综合评价结果表明，在无袋栽培模式下，瑞香红、粉红女士、秦月、秦阳、瑞阳为综合评价结果较好的品种，而长富 2 号、玉华早富、烟富 6 号、2001 富士综合评价结果较差，模型所得结果与生产实际表现一致。

表 7 综合评价得分及排名

Table 7 Comprehensive evaluation score and ranking

品种 Variety	层次分析法得分 Analytic Hierarchy Process Score	排名 Rank	熵权法得分 entropy weight method Score	排名 Rank	综合得分 comprehensive score	排名 Rank
秦阳 Qin Yang	0.6987	5	1.5839	3	1.1413	4
嘎拉 Gala	0.6074	6	1.0282	8	0.8178	8
蜜脆 Honey crisp	0.4233	17	0.8259	12	0.6246	12
玉华早富	0.4098	19	0.5304	19	0.4701	19
秦月 Qin Yue	0.7917	4	1.5388	4	1.1653	3
秦韵 Qin Yun	0.5323	10	0.7030	14	0.6177	14
瑞阳 Rui Yang	0.7956	2	1.4434	5	1.1195	5
瑞雪 Rui Xang	0.5493	8	1.2598	6	0.9045	6
瑞香红 Rui Xiang hong	0.8721	1	1.7107	2	1.2914	1
粉红女士 Pink lady	0.7954	3	1.7202	1	1.2578	2
秦冠 Qin Guan	0.5350	9	0.8911	9	0.7131	9
宫崎短富 Fuji	0.5521	7	1.1703	7	0.8612	7
Miyazaki						

长富 2 号 changfu 2	0.3917	20	0.4606	20	0.4261	20
烟富 6 号 Yanfu 6	0.4220	18	0.6566	18	0.5393	18
陕富 6 号 Shanfu 6	0.4799	11	0.8369	10	0.6584	10
礼泉短富 LiQuan duanfu	0.4380	16	0.6588	17	0.5484	17
烟富 3 号 Yanfu 3	0.4731	12	0.8322	11	0.6527	11
秦富 1 号 Qinfu 1	0.4713	13	0.6809	15	0.5761	15
2001 富士 2001 Fuji	0.4615	15	0.6783	16	0.5699	16

3 讨论

随着苹果无公害栽培技术的推广、果园套袋成本增加和低碳经济发展的需要,苹果无袋栽培必将成为发展趋势^[18-20]。无袋栽培后果实外观品质差是未来需要继续研究和解决的问题。当前,无袋栽培苹果的外观品质改良可以通过栽培手段、品种的选择以及市场的导向去引领无袋栽培苹果产业的发展。研究表明,外观品质的好坏直接影响消费者对水果产品的喜爱程度,外观品质是消费者是否继续购买的第一要素^[19]。在栽培技术方面,通过喷施生物保护膜来代替套袋,陈学森等试验发现,在‘富士’苹果上喷施“阳光生物保护膜”,可以增加果面光洁明亮^[20]。吕骄阳通过对富士系苹果喷生物保护膜减少了残次果率,增加了果面光洁,未提升果面着色^[21]。喷生物保护膜也会增加生产成本,且未实现真正意义上的无袋化,这项栽培对无袋栽培苹果外观品质提升中发挥的作用较小。在品种选择方面,一是通过育种手段育成适于无袋栽培的苹果品种,如早熟品种‘烟香玉’^[22]、晚熟品种‘瑞阳’^[23]、‘瑞香红’^[24]等,但果树育种年限较长、育种目标实现较难。二是通过品种评价,集合目前现有的苹果品种,在无袋栽培模式下对不同苹果果实品质进行客观评价,筛选出当前较适于某地区种植的苹果品种。

本研究所选取的 18 项指标是栽培和育种中最常用、最基础且容易测定的指标。由于品种数量较多,测定这些指标需要较大的工作量,对于体现品种特色但测定方法较为复杂的指标,如香气、类黄酮、矿质元素及其他营养品质因子并未考虑进去。本研究确定的核心指标果面光洁指数、硬度、果皮花青苷含量、固酸比、维生素 C 含量。其中,果面光洁指数是评价无袋栽培果实外观品质的重要指标^[4];硬度是构成果实质地的重要因子^[25];果皮色泽是评价果实商品价值的重要指标,果皮花青苷含量在果皮色泽形成过程中对果皮着色起重要作用^[26-27],花青苷含量越多果皮红色度越深;固酸比直接影响果实风味品质,是评价果实品质和风味的重要因子^[28],维生素 C 不仅是一种重要的营养品质,而且作为一种功能性的代谢

物质，在植物的生长发育、光合作用和延缓衰老方面有着十分重要的作用^[29]。本研究所筛选出的核心评价指标包含了外观、色泽、质地、风味、营养品质，且指标间相关性小重叠率低。对于无袋栽培苹果品种的选择，本研究是根据某个品种在无袋栽培环境下与其他品种相比果实品质（尤其是外观品质）有无优势决定的，而不是单纯的将某一个品种与其套袋栽培后的果实品质相比来决定。因此，在无袋栽培环境下选出适宜的苹果品种，筛选综合评价的核心指标，简化评价方法，来达到简便有效的目的。本研究基于 AHP-EWM 构建综合评价模型，对陕西渭北地区不同无袋栽培苹果品种的品质给出较全面的评价和分析，为无袋苹果果实品质的综合评价提供新思路。另外，本研究中主要针对着色品种，对于绿色品种运用该筛选模型是否适于无袋栽培还需进行下一步验证分析。

4 结论

本研究结果表明：果面光洁指数、硬度、果皮花青苷含量、维生素 C 含量、固酸比为无袋栽培中品种评价的核心评价指标，可作为无袋栽培苹果品种选择的主要指标；无袋栽培模式下，瑞香红、粉红女士、秦月、秦阳、瑞阳综合品质较好，而长富 2 号、玉华早富、烟富 6 号、2001 富士综合表现较差。

参考文献：

- [1] Zhang Q Y ,Gu K D ,Wang J H ,et al. BTB-BACK-TAZ domain protein MdBT2-mediated MdMYB73 ubiquitination negatively regulates malate accumulation and vacuolar acidification in apple.[J]. Horticulture research,2020,7(1).
- [2] 李海飞, 聂继云, 徐国锋, 等. 套袋与不套袋对苹果食用安全性的影响[J]. 中国果树,2019(4):76-78.
- [3] 张瑞芳. 不套袋对苹果品质的影响及果锈产生主要因素分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [4] 张永茂, 韩明玉, 李丙智, 等. 我国富士苹果无袋栽培建议[J]. 中国果树,2012(5):72-74.
- [5] 李雪, 梁叶星, 许晶冰, 等. 重庆地区鲜食葡萄品质综合评价[J]. 食品与发酵工业,2019,45(11):219-227.
- [6] 刘科鹏, 黄春辉, 冷建华, 等. ‘金魁’猕猴桃果实品质的主成分分析与综合评价[J]. 果树学报, 2012, 29(5): 867-871.
- [7] 唐帅, 易自力, 李娜, 等. 冰糖橙果实品质综合评价量化模型的建立及应用[J]. 果树学报, 2018, 35(7): 889-897.
- [8] 马文霞, 倪玉洁, 谢倩, 等. 鲜食百香果果实品质综合评价模型的建立及应用[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 53-60.
- [9] 张旭, 朱珍珍, 孙鲁龙, 等. 陇东地区不同矮化中间砧对‘长富 2 号’苹果抗寒性的影响[J]. 果树学报, 2020,37(7):985-996.
- [10] 匡立学, 聂继云, 李银萍, 等. 中国不同地区‘富士’苹果品质评价[J]. 中国农业科学,2020, 53(11):2253-2263.
- [11] 邓健康, 刘璇, 吴昕焯, 等. 基于层次分析和灰色关联度法的苹果(等外果)汁品质评价[J]. 中国食品学

- 报,2017,17(4):197-208.DOI:10.16429/j.1009-7848.2017.04.025.
- [12]刘美迎,李小龙,梁苗,等.基于模糊数学和聚类分析的鲜食葡萄品种综合品质评价[J].食品科学,2015,36(13):57-64.
- [13]姜雪峰,毛娟,徐巨涛,等.苹果品质评价模型的建立与验证[J].甘肃农业大学学报,2019,54(3):69-77.
- [14]李健花,高晶晶,冯新新,等.‘金冠’苹果与其无锈芽变的果皮性状比较和防锈技术研究[J].园艺学报,2014,41(1):35-43.
- [15]高俊凤,孙群,曹翠玲.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.114-117;200-203.
- [16]曹健康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.44-46.
- [17]李冬男.蓝莓原料品质特性及其指纹图谱研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [18]李海飞,聂继云,徐国锋,等.套袋与不套袋对苹果食用安全性的影响[J].中国果树,2019(4):76-78.
- [19]岳正洋.不套袋栽培对苹果果实品质及耐贮性的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [20]陈学森,毛志泉,沈向,等.我国苹果产业节本增效关键技术I:易着色功能型苹果新品种培育及无袋化栽培技术[J].中国果树,2017(1):1-4+103.
- [21]吕娇阳.不套袋富士系苹果品种筛选及无袋栽培技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [22]孙燕霞,宋来庆,赵玲玲,等.早熟黄色免套袋苹果新品种烟香玉的选育[J/OL].果树学报:1-5[2022-01-08].
- [23]邓瑞,袁仲玉,赵政阳,等.瑞阳苹果套袋与不套袋果实品质的比较分析[J].甘肃农业大学学报,2019,54(1):74-79+88.
- [24]杨亚州,赵政阳,高华,等.晚熟苹果新品种‘瑞香红’[J].园艺学报,2021,48(3):609-610.DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0810.
- [25]吴萌萌,张瑞萍,史亚娟,等.4个苹果品种贮藏期间果实质地和营养成分的变化[J].果树学报,2020,37(9):1404-1412.
- [26]Do V G,Seonae K,Youngsuk L,Hun J K. Effect of Reflected Sunlight on Differential Expression of Anthocyanin Synthesis-Related Genes in Young Apple Fruit[J]. International Journal of Fruit Science, 2021,21(1):
- [27]Sun C,Wang C M,Zhang W,et al. The R2R3-type MYB transcription factor MdMYB90-like is responsible for the enhanced skin color of an apple bud sport mutant.[J]. Horticulture research,2021,8(1):
- [28]李红英,张磊,张晓煜,等.我国北方高酸苹果综合品质评价[J].食品科学,2017,38(17):32-35.
- [29]汪文杰,刘晓莹,成畅,等.盐和干旱胁迫及光质对猕猴桃叶片维生素C含量与合成基因表达的影响[J/OL].果树学报:1-13[2022-01-08].