

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250402001

引用格式: 张波, 高婧, 王楠楠, 等. 基于质构仪技术的香菇品质综合研究与评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 213–221.

ZHANG B, GAO J, WANG NN, *et al.* Research and comprehensive evaluation on the quality of *Lentinula edodes* based on the texture analyzer method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 213–221. (in Chinese with English abstract).

## 基于质构仪技术的香菇品质综合研究与评价

张波, 高婧, 王楠楠, 刘畅\*

(承德市食品药品检验检测中心, 承德 067000)

**摘要: 目的** 基于全质构测试(texture profile analysis, TPA)法对香菇进行综合评价, 分析比较不同产地香菇的品质。**方法** 以不同产地香菇为实验材料, 利用质构仪的 TPA 模式, 采用统计学分析方法研究影响香菇质地品质的主要指标, 同时结合香菇营养成分对香菇品质进行综合评价。**结果** 统计学分析显示, 质构仪检测得到的香菇 7 种指标参数中, 质地主成分 1 主要包括咀嚼性、胶黏性、硬度 3 个指标, 其中硬度具有最大范围的相关性; 香菇营养成分主成分 1-1 的 3 个重要指标为蛋白质、精氨酸、Ca, 其中 Ca 具有最大范围的相关性。6 个重要指标聚类分析共得到 3 组样品, 其中第 III 类咀嚼性、胶黏性、硬度、蛋白质、精氨酸都相对较高的组别具有较好的综合品质。**结论** 本研究基于 TPA 法结合营养成分对香菇品质进行综合分析, 结果表明承德地区香菇品质较好, 营养成分相对较高, 为香菇的进一步开发利用提供科学依据。

**关键词:** 香菇; 质构仪法; 品质; 营养成分

### Research and comprehensive evaluation on the quality of *Lentinula edodes* based on the texture analyzer method

ZHANG Bo, GAO Jing, WANG Nan-Nan, LIU Chang\*

(Chengde City Food and Drug Inspection Center, Chengde 067000, China)

**ABSTRACT: Objective** To comprehensively evaluate *Lentinula edodes* quality using texture profile analysis (TPA) and compare characteristics across different geographical origins. **Methods** Using *Lentinula edodes* from different origins as experimental materials, the TPA model of texture analyzer was used to study the main indicators that affect the texture quality of *Lentinula edodes* by statistical analysis methods, at the same time, the quality of *Lentinula edodes* was comprehensively evaluated in combination with the nutrients of *Lentinula edodes*. **Results** Statistical analysis showed that among the 7 kinds of index parameters of *Lentinula edodes* detected by the texture analyzer, principal component 1 mainly included 3 indicators: Chewing ability, adhesiveness and hardness, among which the hardness had the maximum range of correlation. The 3 important indicators of principal component 1-1 in *Lentinula edodes* were protein, arginine and Ca, among which Ca had the maximum range of correlations. Cluster analysis of 6 important indicators yielded 3 groups of *Lentinula edodes*. Among them, the third group, which had

收稿日期: 2025-04-02

基金项目: 承德市基础研究项目(202305B075)

第一作者: 张波(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为食品检验检测。E-mail: 84477061@qq.com

\*通信作者: 刘畅(1997—), 女, 硕士, 初级工程师, 主要研究方向为食品检验检测。E-mail: 965867359@qq.com

relatively high values in chewiness, stickiness, hardness, protein and arginine, had a better overall quality.

**Conclusion** This study conducts a comprehensive analysis of the quality of *Lentinula edodes* based on the TPA method combined with nutrients. The results show that *Lentinula edodes* in Chengde are good quality and relatively high nutritional content, providing a scientific basis for the further development and utilization of *Lentinula edodes*.

**KEY WORDS:** *Lentinula edodes*; texture analyzer; quality; nutrient content

## 0 引言

香菇(*Lentinula edodes*)是药食同源菌类,属于担子菌纲、伞菌目、口蘑科。香菇富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、粗纤维、微量元素及维生素等营养成分<sup>[1]</sup>,同时具有增强免疫力、减少炎症、降血压、抑制肿瘤等功效<sup>[2-5]</sup>。香菇是世界上栽培最广泛的食用菌之一,而中国则是全球第一大香菇生产国<sup>[6]</sup>,其中河北省是主栽培香菇品种的产地之一,全省香菇生产已经覆盖到 60 多个县市<sup>[7-8]</sup>。不同产地香菇品质差异的主要因素包括温度、湿度、海拔、光照、土壤与水质及重要栽培技术等<sup>[9-13]</sup>。承德市独特的气候环境,早晚温差大,产出的香菇密度高、弹性大、富集营养成分,特别是平泉香菇已经成为地理标志产品<sup>[14-15]</sup>。香菇品质的基本评价指标包括菌盖厚度、菌肉质度、菌产量等,但随着健康食品要求的日益提高,香菇内在品质也成为影响栽培者种植和消费者选购的重要因素<sup>[16]</sup>。但目前针对承德地区香菇的研究主要集中在高产高质栽培技术,对于香菇内在品质研究较为欠缺。同时,现行食品标准仅有 GB/T 38581—2020《香菇》、GH/T 1013—2015《香菇》、GB/Z 26587—2011《香菇生产技术规范》、NY/T 1061—2006《香菇等级规格》、NY/T 1283—2007《香菇中甲醛含量的测定》,无法充分贴合不同地区香菇特点进行研究,缺少地缘性、综合性的香菇内在品质评价研究,因此结合基本物理性状来评判研究香菇品质优劣成为重要手段之一。

质构仪作为一种物理性状测试仪,是公认的物性标准检测仪器<sup>[17-19]</sup>,目前被广泛应用于对多种不同果实样本进行质地参数检测,包括梨<sup>[20]</sup>、桑葚<sup>[21]</sup>、甜椒果实<sup>[22]</sup>及草莓果干<sup>[23]</sup>等。全质构测试(texture profile analysis, TPA)法是一种常用的果实质地分析法,通过模拟人口腔的咀嚼运动,对样品分次压缩,从而得出一系列质地参数,较为客观地反映果实的质地特性<sup>[24]</sup>。质地是鲜菇类包括香菇的品质及储藏能力的主要指标之一<sup>[25-26]</sup>,利用质构仪结合 TPA 法与传统感官不仅能够对香菇的不同部位进行品质分析评价<sup>[27]</sup>,也可以对不同种类的香菇质地进行评价筛选<sup>[28]</sup>。目前,TPA 法对于香菇内在品质的研究相对较少,集中于以传统统计学方法对香菇不同部位、不同种类的质地参数进行研究,而将香菇营养成分和质地品质结合的综合分析并不完善,尚未形成系统性评价香菇综合品质的方法。

本研究基于 TPA 法,采用统计学分析方法研究影响

不同产地香菇品质的主要指标,并对样品进行质地和营养成分的系统分析评估,也为承德地区香菇产业发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试品种主要为河北承德地区的香菇,挑选不同产地的香菇共 11 种,该地区产出的香菇是知名农产品,具有品味纯正、干物质含量高特性。同时还搜集了产地为山东的香菇共 3 种、产地为河南的香菇 2 种。所有香菇均在采摘期,挑选成熟度相似、大小均一且无损伤的作为试样,取样当天用质构仪测定咀嚼性、硬度等指标参数。16 种香菇的编号及详细产地见表 1。

表 1 16 种香菇样品编号及产地  
Table 1 Sample number and origin place of 16 kinds of *Lentinula edodes*

样品编号	产地
Y1	山东 Z1
Y2	山东 Z2
Y3	山东 Z3
Y4	承德市双滦区大庙镇
Y5	承德市平泉市党坝镇
Y6	承德市平泉市黄土宋子
Y7	河南京百味
Y8	承德市平泉市南五十家子镇
Y9	承德市平泉市四合园
Y10	承德市平泉市王土房
Y11	承德市平泉市卧龙镇
Y12	河南西峡
Y13	承德市平泉市小寺沟
Y14	承德市平泉市杨树岭
Y15	承德市兴隆县东南沟
Y16	承德市兴隆县东南沟

### 1.2 仪器

TMS-PRO 型质构分析仪、TMS-PRO 型质构分析仪 3 种探头 P/2(柱形,直径 2 mm)、P/5(柱形,直径 5 mm)、P/10(柱形,直径 10 mm)、TMS-Pro/Touch 型物性分析软件

(美国 Food Technology Corporation 公司); SCIEX Triple Quad 5500+液相色谱质谱联用仪(美国 AB SCIEX 公司); KjeltcTM8200 凯式定氮仪(瑞典 FOSS 公司); PE350D 电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)(美国 PerkinElmer 公司)。

### 1.3 实验方法

采用质构仪 TPA 模式对 16 种不同品种的香菇 Y1~Y16 进行内在品质分析研究, 主要包含硬度 1、黏附性、内聚性、弹性、胶黏度、咀嚼性、硬度 2。根据香菇样本的基本形态和特性, 设定本研究的测试速度为 60 mm/min, 形变量为 50%, 2 次压缩停顿时间为 0.00 s, 触发力为 0.2 N。压缩实验时选择标准圆盘探头, 用于使固体样品变形, 通过质构仪分析, 得出香菇受力随时间变化曲线, 同时计算香菇的硬度、弹性和咀嚼性, 每种样品 3 个平行样品。

硬度: 感官定义为用牙齿对食品上进行挤压的力量, TPA 值=第一次挤压循环的最大力量峰值; 弹性: 感官定义为在食品上施加一定的力量后, 测量样品在一定时间内恢复到原来形状的程度, 以计算出样品的弹性值, TPA 值=第一次挤压结束后第二次挤压开始前样品所能回复的高度; 黏附性: 感官定义为克服食品表面同其他物质表面接触之间吸引力所需要的能量, TPA 值=第一次挤压的负峰面积, 即探头脱离样品表面所做的功; 内聚性: 感官定义为样品内部的吸缩力, TPA 值=第二次压缩环的正峰面积/第一次挤压循环的正峰面积; 胶黏性: 感官定义为食品吞咽前破碎它需要的力量, TPA 值=硬度值×内聚性; 咀嚼性: 感官定义为咀嚼固体样品时需要的能量, TPA 值=胶黏性×弹性。

香菇中氨基酸的测定参考 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》, 采用液相色谱-质谱法进行检测; 香菇中 K、Mg、Ca 的测定参考 GB 5009.268—2025《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》, 采用 ICP-MS 测定; 香菇中蛋白质的测定参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》, 采用凯式定氮法进行检测。

### 1.4 数据处理

样品重复测定 3 次, 实验数据结果采用 Origin 2021 软件分别对质构参数和营养成分进行方差分析和多重比较, 柱状图绘制差异性分析、主成分分析、相关性分析、聚类分析统计图, 设置  $P<0.05$  为显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种类香菇质地参数的差异性分析

由图 1A 分析可知, 承德市平泉的香菇 Y5 具有最大的咀嚼性, 与其他产地的香菇之间表现差异显著( $P<0.05$ )。山

东不同产地的 3 种香菇之间差异不显著, 其中 Y2 的咀嚼性在所有样品中最小; 河南不同产地的 2 种香菇也呈现不显著差异, 咀嚼性大小值居中。整体来看, 承德平泉香菇咀嚼性高的样品数量较多, 山东香菇 Y3 的咀嚼性在山东 3 种香菇中最高, 但在所有样品中大小值居中。相比之下, 平泉香菇具有较好的咀嚼性, 整体表现更佳。

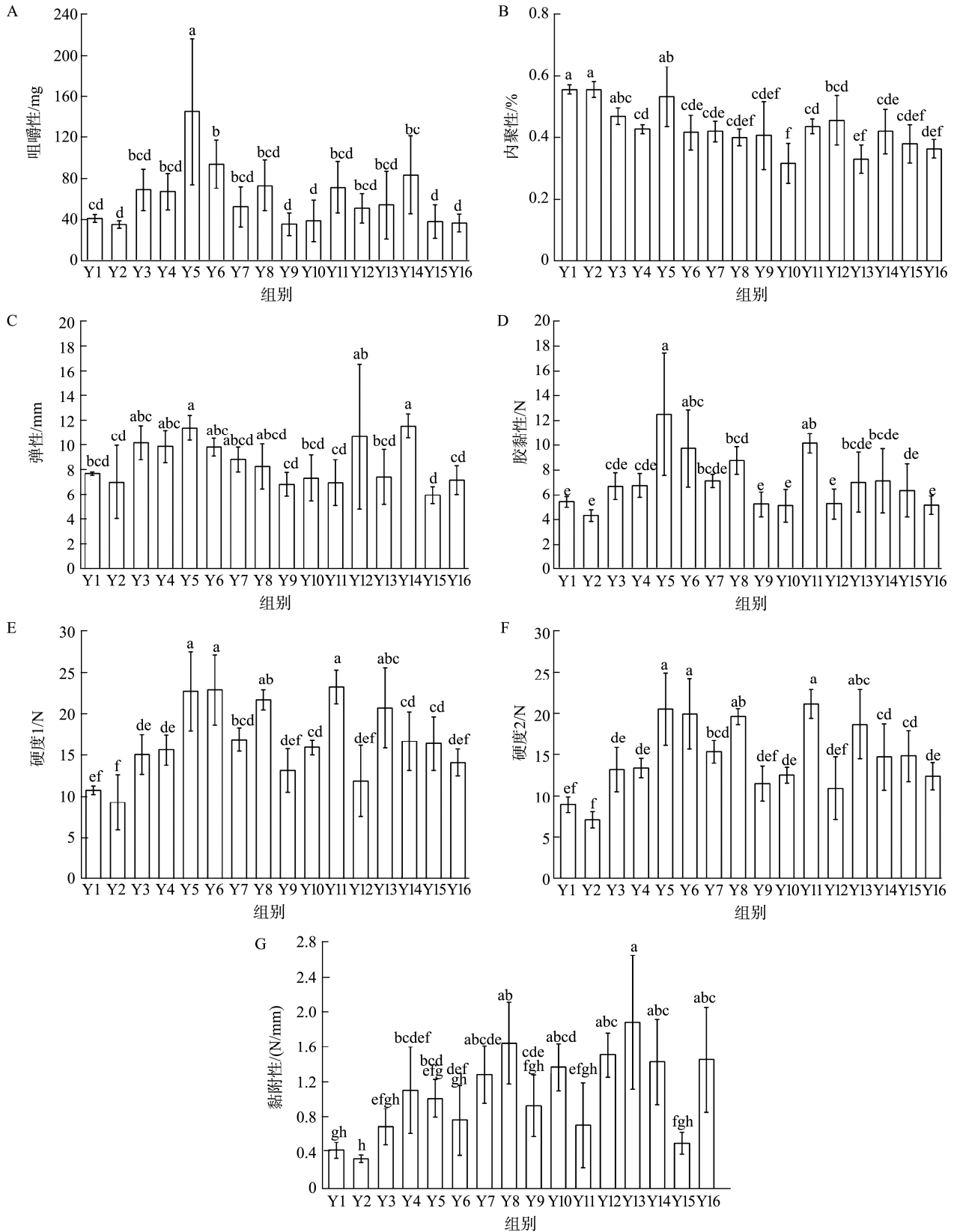
针对内聚性分析可知, 山东的香菇内聚性较好, 其中 Y1 和 Y2 内聚性差异不显著, 均具有最大内聚性; 河南 2 种香菇之间差异也不显著, 但与山东香菇 Y1 和 Y2 差异显著; 承德香菇内聚性根据不同区县产地有所不同, 其中 Y10 内聚性最低。在样品中, 承德香菇内聚性总体与其他产地相差数值不大; 双滦区、平泉市、兴隆县与河南地区大部分香菇之间差异不显著(图 1B)。

不同产地的香菇所具有的弹性有所不同, 其中承德地区的香菇弹性部分优于其他产地的香菇, 山东香菇分别与承德平泉、双滦、兴隆的部分香菇存在相似的弹性, 河南香菇 Y7 与承德平泉香菇 Y8 弹性无显著差异, 河南香菇 Y12 弹性值高于 Y7, 但仍低于平泉香菇 Y5 和 Y14, 且 Y5 和 Y14 弹性显著高于其他大部分样品, 其中平泉香菇 Y14 具有最高的弹性值(图 1C)。

承德地区香菇胶黏性表现较好, 其中承德平泉香菇 Y5 具有最大胶黏性, 且显著高于其他大部分样品。山东香菇 Y2 具有最小胶黏性; 山东香菇 Y1、Y2, 河南香菇 Y12 与承德地区 3 种香菇 Y9、Y10、Y16 具有相似的胶黏性, 同时显著低于承德平泉 4 种香菇 Y5、Y6、Y8、Y11 ( $P<0.05$ )(图 1D)。

由图 1E 和 1F 分析可知, 承德平泉香菇 Y5、Y6、Y11 硬度 1 显著高于其他大部分产地的香菇( $P<0.05$ ), 而山东香菇 Y2 硬度 1 最低, 低于其他产地的香菇; 同时大部分承德地区香菇硬度 1 与其他产地香菇存在显著差异( $P<0.05$ ), 山东香菇 2 种样品分别与河南香菇、承德香菇大部分样品之间存在显著差异( $P<0.05$ )。承德香菇 Y5、Y6、Y11 之间, Y10、Y14、Y15 之间分别存在相似的硬度 1 值。与硬度 1 测定结果一致, 承德平泉香菇 Y5、Y6、Y11 硬度 2 显著高于其他大部分产地的香菇, 而山东香菇 Y2 硬度 2 最低; 同时大部分承德地区香菇硬度 2 与其他产地香菇存在显著差异( $P<0.05$ ), 产地相近的香菇硬度 2 则具有一定的相似性, Y4、Y10、Y16 之间, Y5、Y6、Y11 之间, Y9 与 Y12 之间, Y14 与 Y15 之间存在相似的硬度 2 值。硬度 1 和硬度 2 综合反映出承德平泉香菇具有较好的抗压能力和形变能力, 口感更佳。

大部分承德地区香菇的黏附性与其他产地香菇黏附性存在显著差异( $P<0.05$ ), 同时相同地区样品大部分具有相似性, 承德平泉香菇的黏附性相比其他产地香菇表现更好, 其中承德平泉香菇 Y13 具有最大黏附性; 山东香菇 Y2 具有最小黏附性(图 1G)。



注: 不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 16 类香菇质地差异性比较

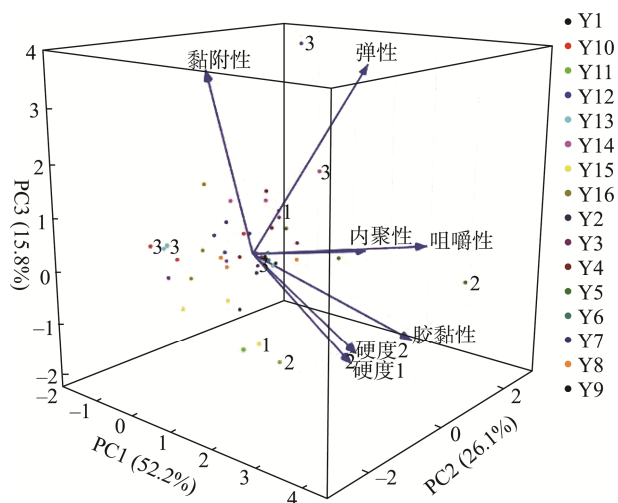
Fig.1 Comparison of texture differences between 16 kinds of *Lentinula edodes*

### 2.2 不同种类香菇质地参数的主成分分析

特征值大于 1 的原则, 提取出 3 个主成分, 从表 2 和图 2 可以看出, 7 个指标与主成分 1 (principal component 1, PC1)均呈现正相关, 按照贡献率指标主要为咀嚼性、胶黏性、硬度, 可作为适口性因子; 主成分 2 (principal component 2, PC2)的主要贡献率指标为弹性和内聚性, 可作为内聚因子; 主成分 3 (principal component 3, PC3)的主要贡献指标为黏附性, 可作为黏附因子。累计方差贡献率总计为 94.13%, PC1 占 52.20%, PC2 占 26.12%, PC3 占 15.81%。因此, 这些香菇的质地参数可通过适口性因子、内聚因子、黏附因子 3 种依据来评价, 其中适口性因子对于质地参数好坏的评判影响最大。

表 2 主成分贡献率  
Table 2 Contribution rate of principal component

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.65	52.20	52.20
2	1.82	26.12	78.32
3	1.10	15.81	94.13



注: 数字 1~3 表示根据 PC1~PC3 数据集中方差大小排列组合成的数量集。

图 2 质地指标主成分分析

Fig.2 Analysis of principal components of texture index

### 2.3 不同种类香菇质地指标的相关性分析

由图 3 可知, 在  $P$  为 0.05 水平下, 咀嚼性与其他指标之间具有正相关性, 与胶黏性之间存在最高正相关性, 硬度具有最大范围相关性, 除与内聚性具有负相关性, 与其他指标均呈现正相关性, 因此可以通过硬度指标来反映香菇的质地品质。由此可见, 咀嚼性、胶黏性和硬度能够更全面地概括出这些香菇的质地参数, 更明确地对这些香菇进行质地品质评判; 因此, 可主要考察香菇这 3 种参数的 TPA 值, 对香菇品质进行综合分析。

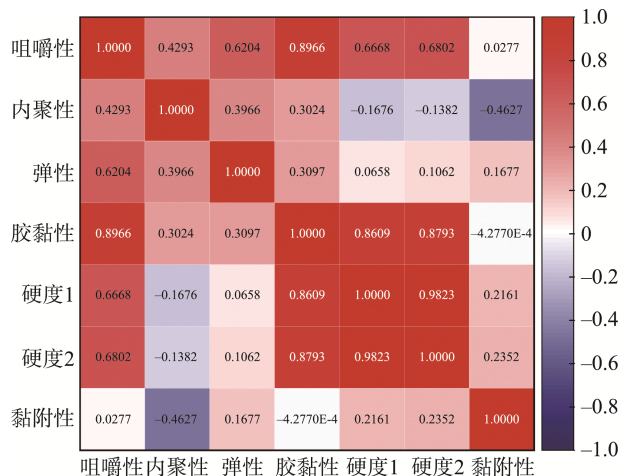


图 3 质地参数的相关性

Fig.3 Correlation of texture parameters

### 2.4 不同种类香菇营养成分的差异性分析概述

对香菇样品的营养成分所得数据进行初步比较和差异分析, 主要包括香菇的蛋白质、总糖、脂肪、K、Mg、Ca、氨基酸、谷氨酸。

由图 4A 知, Y15 具有最高的蛋白质含量, 且与其他样品均差异显著 ( $P < 0.05$ ); Y1、Y2、Y3 与 Y7, Y5 与 Y14, Y6、Y9 与 Y13 分别差异不显著; 不同产地的干香菇中蛋白质含量在 19.98%~28.04%之间, 承德地区的蛋白质含量普遍高于其他省份 ( $P < 0.05$ )。

由图 4B 可得, Y5 具有最高的总糖含量, 且与其他样品均差异显著 ( $P < 0.05$ ); Y7 与 Y15, Y3 与 Y14, Y1 与 Y4, Y2 与 Y8 分别具有不显著差异; 不同产地的香菇中的总糖含量在 33.1%~42.7%之间, 不同产地间的含量相差不大。

相同产地香菇之间的脂肪含量差异不显著, Y1、Y2、Y3、Y6、Y9、Y10 与 Y14, Y5 与 Y16, Y7、Y11 与 Y12, Y8 与 Y13 之间差异不显著; Y1、Y2、Y3、Y6、Y9、Y10、Y14 与 Y5、Y8、Y13、Y15 的脂肪含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); Y4 与 Y5、Y7、Y8、Y11、Y12、Y13、Y15、Y16 差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同产地的干香菇中脂肪含量在 1.3%~2.5%之间 (图 4C)。

承德地区香菇 Y13 具有最高的 K 含量, 且与 Y8 差异不显著 ( $P > 0.05$ ); Y1、Y2、Y10 与 Y15, Y9、Y14 与 Y16, Y7 与 Y12 之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (见图 4D)。Y1、Y3、Y13、Y14、Y15 与 Y16, Y2、Y8 与 Y11, Y4、Y6、Y9 与 Y10, Y7 与 Y12 具有相似的 Mg 含量, 其中, Y7 与 Y12 含量最低; Y5 具有最高的 Mg 含量, 且与其他样品呈显著差异 ( $P < 0.05$ ) (图 4E)。Y15 具有最高的 Ca 含量, Y16 次之, 且分别与其他样品呈显著差异; Y3 与 Y11, Y4、Y8 与 Y10, Y7 与 Y12 之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (图 4F); Y6 的 Ca 含量最低。不同产地的香菇中  $K > Mg > Ca$  的含量, 承德地区香菇中 K 的含量普遍高于其他省份。

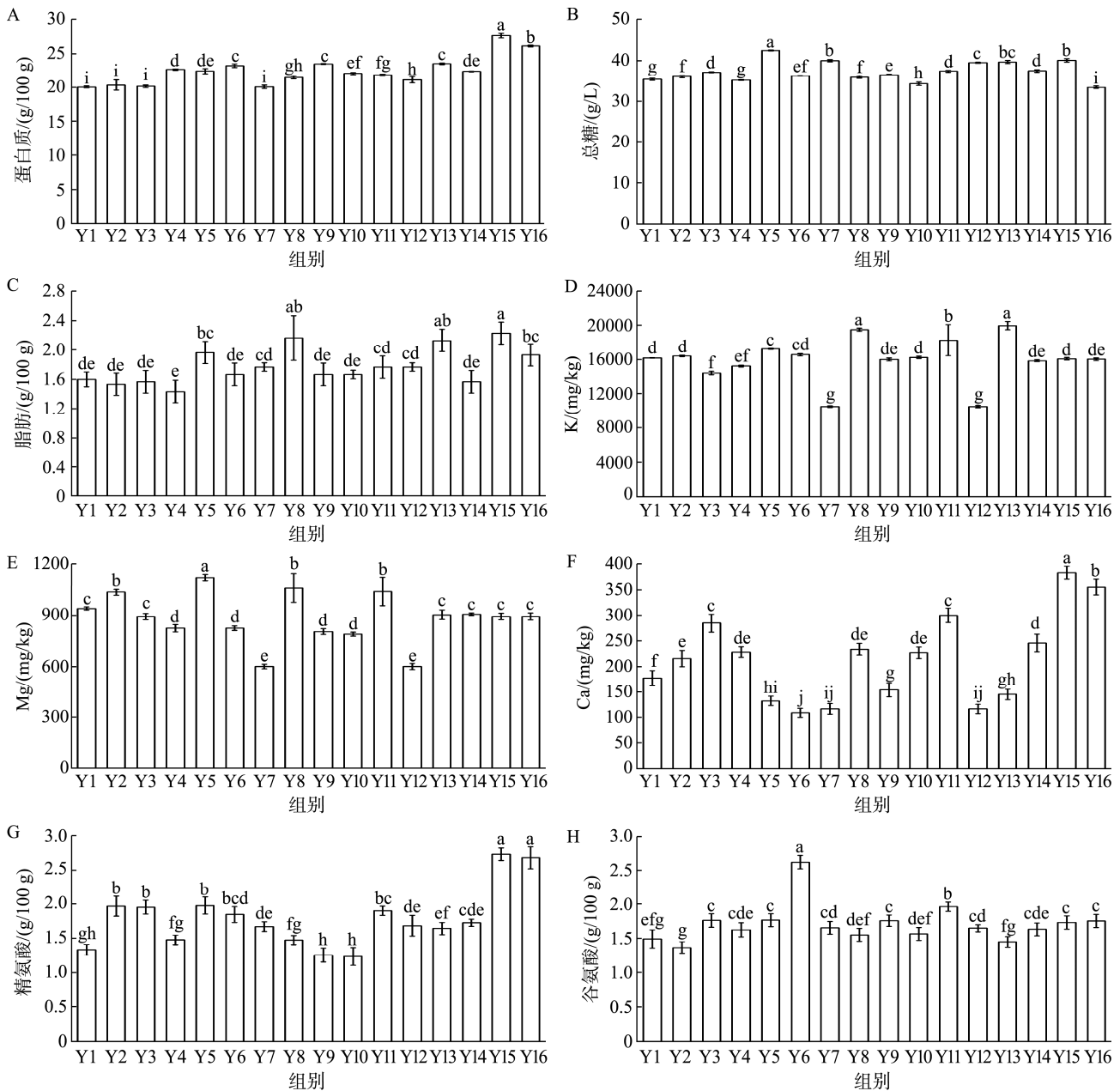


图 4 16 种香菇营养成分差异比较

Fig.4 Comparison of the nutritional components of 16 kinds of *Lentinula edodes*

部分相同产地香菇之间氨基酸含量差异不显著; Y15 与 Y16, Y2、Y3 与 Y5, Y4 与 Y8, Y7 与 Y12, Y9 与 Y10 呈现不显著差异 ( $P>0.05$ ), 且每组相互之间存在显著差异, 其中承德地区香菇 Y15 与 Y16 的精氨酸含量最高(见图 4G)。承德地区香菇 Y6 具有最大的谷氨酸含量, Y11 次之, 且分别与其他样品呈显著差异 ( $P<0.05$ ); Y3、Y5、Y9、Y15 与 Y16, Y4 与 Y14, Y7 与 Y12, Y8 与 Y10 呈现不显著差异 ( $P>0.05$ )(图 4H)。不同产地干香菇中的必需氨基酸和非必需氨基酸中谷氨酸和精氨酸的含量普遍较高。

## 2.5 不同种类香菇营养成分的主成分分析及相关性分析概述

提取出 3 个主成分, 特征值均大于 1.2, 从表 3 和图 5 可以看出, 8 个指标与 PC1 均呈现正相关, 主要贡献指标分别为蛋白质、精氨酸、Ca; PC2 主要贡献指标为总糖、精氨酸; PC3 主要贡献指标为总糖、脂肪。前 3 个累计方差贡献率总计为 71.70%, PC1 占 34.27%, PC2 占 20.24%, PC3 占 17.19%。由此可见, 香菇营养成分可通过这 3 种主成分进行评估, 其中主成分 1 占比最大。

表 3 营养成分主成分贡献率  
Table 3 Contribution rates of nutritional components

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	2.74	34.27	34.27
2	1.61	20.24	54.51
3	1.37	17.19	71.70

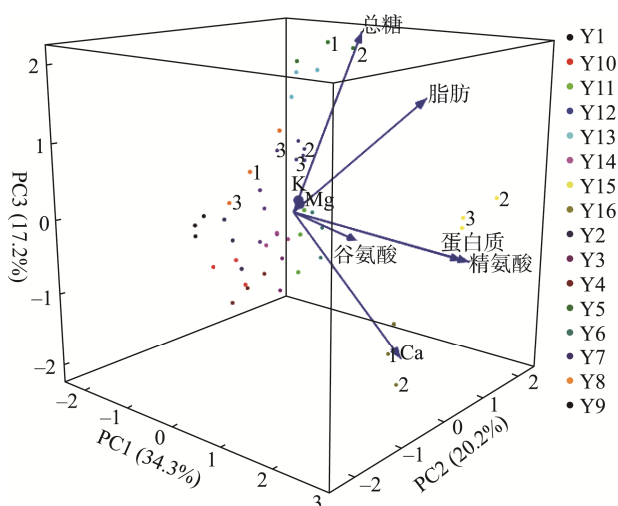


图 5 营养成分参数主成分分析  
Fig.5 Analysis of principal components of nutritional components

由图 6 可知, 在 0.05 显著水平下, 蛋白质与其他指标之间具有正相关性, 且与精氨酸之间具有最高正相关性; Ca 离子具有最大范围的相关性, 与谷氨酸和总糖具有负相关, 与其他指标呈正相关性。其中, 承德平泉香菇 Y5 同时具有最大总糖、Mg 含量, 第 III 类承德兴隆香菇同时具有最大蛋白质、K、Ca、精氨酸含量。总体比较可得承德地区香菇营养成分中蛋白质含量普遍高于其他地区, 是相对较佳的食用类型。

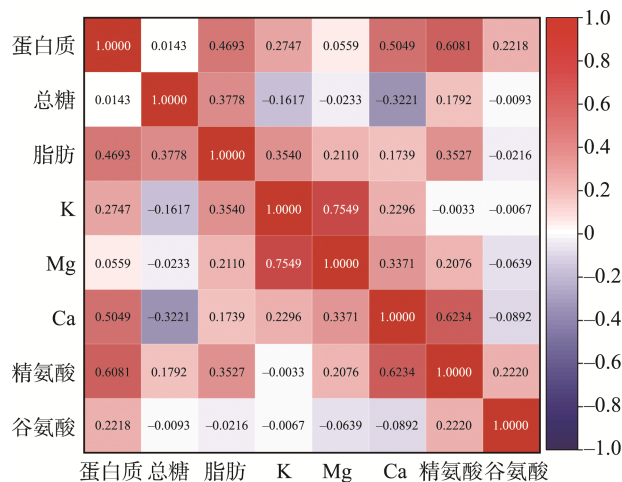


图 6 营养成分参数的相关性  
Fig.6 Correlation of nutritional component parameters

## 2.6 香菇品质聚类分析综合评价

分别选取质地主成分分析 PC1 的主要贡献指标咀嚼性、胶黏性、硬度, 营养成分主成分 PC1-1 的主要贡献指标蛋白质、精氨酸、Ca, 共 6 种进行聚类分析。如图 7 所示, 16 种样品共得到 3 种大类别, 第 I 类包括 Y1、Y2、Y3、Y9、Y10、Y11、Y15、Y16, 第 II 类包括 Y4、Y7、Y8、Y12、Y13、Y14, 第 III 类包括 Y5、Y6。其中, 第 I、II、III 类最具代表性的样品分别为 Y10、Y14、Y5。

由表 4 可见, 在这 3 类中咀嚼性、胶黏性、硬度、

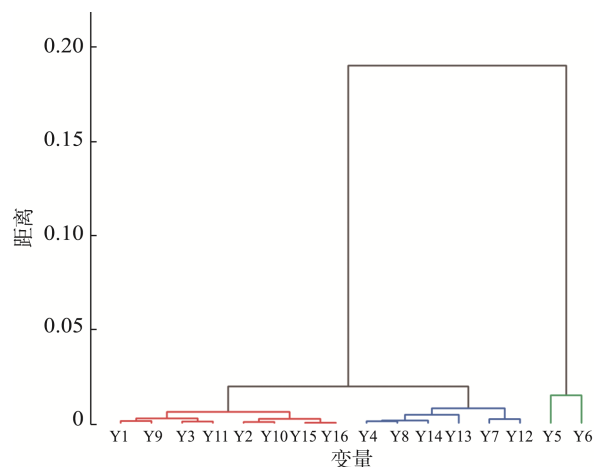


图 7 不同香菇样品聚类分析  
Fig.7 Clustering analysis of different *Lentinula edodes* samples

表 4 不同香菇样品品质分布

Table 4 Quality distribution of different *Lentinula edodes* samples

分类	测定指标	个数	均值	区间
I 类	咀嚼性		46.0217	35.58~71.59
	胶黏性		6.0346	4.29~10.13
	硬度 1		14.8508	9.39~23.35
	硬度 2	8	12.8158	7.20~21.25
	蛋白质		22.7663	20.11~27.67
	Ca		262.6804	154.81~383.70
	精氨酸		1.8888	1.24~2.74
II 类	咀嚼性		63.7856	51.22~83.59
	胶黏性		6.9922	5.24~8.75
	硬度 1		17.3495	11.97~21.80
	硬度 2	6	15.5495	11.03~19.72
	蛋白质		21.9256	20.14~23.56
	Ca		181.3594	116.59~246.49
III 类	精氨酸		1.6189	1.48~1.73
	咀嚼性		119.6417	93.84~145.43
	胶黏性		11.1017	9.71~12.49
	硬度 1		22.9183	22.83~23.00
	硬度 2	2	20.3450	20.06~20.63
	蛋白质		22.8700	22.47~23.26
	Ca		120.7767	108.95~132.60
	精氨酸		1.9183	1.85~1.98

蛋白质、Ca、精氨酸均呈现不同的差异。第I类的特点是咀嚼性、胶黏性、硬度都相对较低, Ca 含量相对较高, 精氨酸居于其他两类之间, 蛋白质组内含量跨度大, 平均含量也居于其他两类之间, 为综合评估较低组。第II类的咀嚼性、胶黏性、硬度、Ca 都居于其他两类之间, 蛋白质和精氨酸含量相对较低, 为综合评估居中组。第III类的咀嚼性、胶黏性、硬度、蛋白质、精氨酸都相对较高, Ca 含量相对较低, 为综合评估较高组。

### 3 讨论

本研究基于质地品质和营养成分通过 TPA 法得到 6 种不同产地的香菇质地指标参数, 多重比较和差异分析获得了其质地特性, 相关性分析和主成分分析进一步计算出香菇种类之间的评价指标, 然后通过对香菇的营养成分进行比较和差异分析得到其营养成分特性, 主成分分析后得出营养成分的主要评价指标, 最后结合质地参数和营养成分分析对香菇品质进行综合评价。结果表明这 16 类香菇中, 承德地区香菇普遍硬度偏高, 有较好的弹性和咀嚼性, 其中, 产地为承德平泉的香菇具有更高的硬度和咀嚼性。与此同时, 平泉香菇也具有较高的蛋白质和总糖含量。这可能是由于硬度与纤维含量存在联系, 在一定范围内, 纤维和蛋白含量与硬度和咀嚼性呈现正相关<sup>[29]</sup>。相关性分析表明, 香菇质地与硬度具有最大范围相关性, 除与内聚性具有负相关性, 与其他指标均呈现正相关性。这与食品相关的研究结果一致<sup>[22,30-31]</sup>, 香菇越硬实, 香菇弹性越大, 越耐咀嚼, 因此能够用硬度指标来反映这 16 种香菇的质地特性。香菇质地和营养成分主成分分析结果分别筛选出 3 个香菇质地影响因子, 质地品质中占比最高的影响因子 PC1 的重要指标包括了咀嚼性、胶黏性和硬度, 营养成分中包括蛋白质、Ca、精氨酸。6 个指标的聚类分析结果显示第III类样品具有最好的综合品质, 均为承德香菇品种 Y5 和 Y6。综上所述, 香菇中营养成分蛋白质、多糖、Ca 和精氨酸含量能够影响香菇的咀嚼性、胶黏性和硬度等质地参数, 并呈正相关。在 16 种香菇中, 承德地区的香菇品质各有不同, 相较于其他地区的样本较优, 平泉香菇整体表现相对较优于其他品种, 平泉香菇中 Y5 的品质相对较好, 其硬度和咀嚼性相对较高, 且蛋白质等多种营养成分含量也较高, 是作为功能性食品原料开发利用和定向育种亲本材料的优秀种类。

### 4 结论

本研究通过对市场流通中香菇品质口碑较好并且呈规模种植的 6 个产地 16 类香菇的质地特性和营养成分进行综合分析, 发现承德平泉地区的香菇品质较优, 其中平泉香菇 Y5 表现最佳, 具有较高的硬度、咀嚼性和总糖含量。主成分分析表明, 质地品质主要由咀嚼性、胶黏性和硬度

决定, 而营养成分以蛋白质、Ca 和精氨酸为关键指标。相关性分析显示硬度与弹性、咀嚼性呈正相关, 与内聚性呈负相关。综合来看, 承德平泉昼夜温差大的季风性气候对香菇中蛋白质等营养成分的累积有重要作用, 而蛋白质、钙和精氨酸的含量能够影响口感, 所以承德平泉香菇 Y5 具有优异的质地和营养特性, 适合作为功能性食品原料或育种亲本材料。

### 参考文献

- [1] 陈建胜, 杨正友, 王延圣, 等. 食用菌营养组成、功能活性及加工现状研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 358-366.  
CHEN JS, YANG ZY, WANG YS, *et al.* Research progress in nutrient composition, functional activity and processing status of edible fungi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 358-366.
- [2] 章烨雯, 何玉妃, 谢凝梅, 等. 香菇多糖的提取方法及生物活性研究进展[J]. 食品工业, 2023, 44(12): 152-155.  
ZHANG HW, HE YF, XIE TM, *et al.* Research progress on extraction methods and biological activity of lentinan [J]. The Food Industry, 2023, 44(12): 152-155.
- [3] 唐作顺, 莫文湛, 钟强, 等. 香菇多糖对黄羽肉鸡生长性能及免疫功能的影响[J]. 饲料工业, 2024, 45(4): 24-29.  
TANG ZS, MO WZ, ZHONG Q, *et al.* Effects of *Lentinan* on growth performance and immune function of yellow-feathered broilers [J]. Feed Industry, 2024, 45(4): 24-29.
- [4] 严啸. 香菇多糖通过 PSMB8-ATRAP 通路抑制高血压相关肠道损伤[C]. 银川: 中国营养学会特殊营养分会, 2023.  
YAN X. *Lentinan* inhibits hypertension-related intestinal damage through the PSMB8-ATRAP pathway [C]. Yinchuan: Special Nutrition Branch of Chinese Nutrition Society, 2023.
- [5] 张忠, 吴迪, 李文, 等. 香菇菌渣蛋白聚糖的分离纯化、结构特征和抗炎活性研究[C]. 福州: 中国食用菌协会药用真菌委员会, 2023.  
ZHANG Z, WU D, LI W, *et al.* Isolation, purification, structural characteristics and anti-inflammatory activity of chitosan from *Lentinan* mycelial residue [C]. Fuzhou: Pharmaceutical Fungi Committee of China Edible Fungi Association, 2023.
- [6] 曹斌, 张月吟, 高博. 全球香菇产业发展历史、现状及趋势[J]. 食用菌学报, 2024, 31(3): 1-20.  
CAO B, ZHANG YY, GAO B. Development history, current situation and trends of global *Lentinula edodes* industry [J]. Acta Edulis Fungi, 2024, 31(3): 1-20.
- [7] 徐玉妹, 张润清. 我国香菇产业现状及未来发展分析[J]. 中国食用菌, 2021, 40(10): 89-92, 96.  
XU YM, ZHANG RQ. Analysis on the present situation and future development of *Lentinus edodes* industry in China [J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(10): 89-92, 96.
- [8] 李冬梅, 韩倩倩, 通占元. 河北省香菇产业发展分析[J]. 河北农业, 2017(5): 25-26.  
LI DM, HAN QQ, TONG ZY. Analysis of the development of the *Lentinus edodes* industry in Hebei Province [J]. Hebei Agriculture, 2017(5): 25-26.
- [9] 徐洪君. 无公害香菇生长环境与栽培技术探究[J]. 数字农业与智能农机, 2023(2): 87-89.  
XU HJ. Research on the growth environment and cultivation techniques of pollution-free *Lentinula edodes* [J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2023(2): 87-89.
- [10] 孙恬, 姚松君, 刘凤松, 等. 我国四大产区香菇的营养成分比较[J]. 现

- 代食品科技, 2021, 37(12): 97–103, 293.
- SUN T, YAO SJ, LIU FS, *et al.* A comparative study on nutritional compositions of *Lentinula edodes* in four main producing regions in China [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(12): 97–103, 293.
- [11] 卢二乔. 无公害香菇生长环境及栽培技术[J]. *中国果菜*, 2020, 40(8): 113–116.
- LU ERQ. Research on the growth environment and cultivation techniques of pollution-free *Lentinula edodes* [J]. *China Fruit and Vegetable*, 2020, 40(8): 113–116.
- [12] 高亚宁, 刘桂娟, 王秀清, 等. 基于成本与效益的平泉香菇产业发展探讨[J]. *农业技术与装备*, 2025(4): 57–59.
- GAO YN, LIU GJ, WANG XQ, *et al.* Discussion on the development of Pingquan *Lentinula edodes* industry based on cost and benefit [J]. *Agricultural Technology and Equipment*, 2025(4): 57–59.
- [13] 孙波, 赵会长, 周洪英, 等. 香菇工厂化生产研究进展[J]. *北方园艺*, 2024(18): 122–128.
- SUN B, ZHAO HZ, ZHOU HY, *et al.* Research progress on factory cultivation of *Lentinula edodes* [J]. *Northern Horticulture*, 2024(18): 122–128.
- [14] 河北 赋能香菇产业 建设平泉市农业现代化示范区[J]. *农村工作通讯*, 2023(17): 27–28.
- Hebei empowers the *Lentinula edodes* industry and builds a modern agricultural demonstration zone in Pingquan City [J]. *Rural Work Newsletter*, 2023(17): 27–28.
- [15] 赵满堂, 蒋俊杰, 范学钧, 等. 平泉地栽香菇的实践与启示[J]. *食用菌*, 2014, 36(6): 34–36.
- ZHAO MT, JIANG JJ, FAN XJ, *et al.* The practice and insights of growing *Lentinula edodes* in ponds in Pingquan [J]. *Edulis Fungi*, 2014, 36(6): 34–36.
- [16] 曹斌, 高博, 李媛媛. 我国香菇市场供需结构的主要特征、问题与对策建议[J]. *食药菌*, 2023, 31(5): 294–301.
- CAO B, GAO B, LI YY. The main characteristics, problems and countermeasures suggestions of the supply and demand structure in the Chinese *Lentinula edodes* market [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2023, 31(5): 294–301.
- [17] 陈月清, 牛坡. 热风干燥下不同品种猕猴桃果干感官评价与质构特性的相关性分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(17): 273–281.
- CHEN YQ, NIU P. Correlation analysis of sensory evaluation and texture characteristics of dried kiwifruit of different varieties under hot air drying [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(17): 273–281.
- [18] 潘少香, 刘雪梅, 郑晓冬, 等. 基于质构分析的鲜食草莓质地感官品质综合评价[J]. *食品科技*, 2023, 48(8): 37–43.
- PAN SX, LIU XM, ZHENG XD, *et al.* Comprehensive evaluation of texture sensory quality of fresh strawberry based on texture analysis [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(8): 37–43.
- [19] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用[J]. *实验科学与技术*, 2007, 2(5): 1–4.
- SUN CL, TIAN JC, ZHANG YX. Application of TPA test mode in the study of food [J]. *Experimental Science and Technology*, 2007, 2(5): 1–4.
- [20] 徐锴, 张少瑜. 2020 年辽宁兴城早酥梨质构仪 TPA 测试参数设置及数据集[J]. *农业大数据学报*, 2022, 4(3): 41–48.
- XU K, ZHANG SY. TPA test parameter setting and dataset acquisition of Zaosu pear in Xingcheng [J]. *Journal of Agricultural Big Data*, 2022, 4(3): 41–48.
- [21] 王彬彬, 李娜, 贾漫丽, 等. 质构仪检测桑葚质地品质的方法研究[J]. *果树学报*, 2021, 38(11): 2014–2020.
- WANG BB, LI N, JIA ML, *et al.* Measuring texture quality of mulberry fruit using a texture analyser [J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(11): 2014–2020.
- [22] 张红肖, 严立斌, 孟雅宁, 等. TPA 试验测定鲜食甜椒果实质地的研究[J]. *河北农业科学*, 2021, 25(4): 39–43.
- ZHANG HX, YAN LB, MENG YN, *et al.* Study on the determination of fruit texture of fresh sweet pepper by TPA test [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2021, 25(4): 39–43.
- [23] 胡丽丽, 牛丽影, 李大婧, 等. 质构仪探头选择及样品处理对草莓脯 TPA 测定结果的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(5): 170–176.
- HU LL, NIU LY, LI DJ, *et al.* The influence of texture analyzer probe selection and sample preparation on the texture parameters of dried strawberry [J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(5): 170–176.
- [24] 赵爱玲, 薛晓芳, 王永康, 等. 质构仪检测鲜枣果实质地品质的方法研究[J]. *果树学报*, 2018, 35(5): 113–123.
- ZHAO AL, XUE XF, WANG YK, *et al.* Measuring texture quality of fresh jujube fruit using texture analyser [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(5): 113–123.
- [25] 易琳琳, 应铁进. 食用菌采收后品质劣变相关的生理生化变化[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(24): 434–436, 441.
- YI LL, YING TJ. Physiological and biochemical variations in postharvest mushrooms related to their quality deterioration [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(24): 434–436, 441.
- [26] 邹明, 徐鹏亮, 鲁欣欣, 等. 基于质地多面分析法对平菇质构特性的分析[J]. *北方园艺*, 2024(5): 119–126.
- ZOU M, XU PL, LU XX, *et al.* Analysis of textural characteristics of *Pleurotus ostreatus* based on texture profile analysis [J]. *Northern Horticulture*, 2024(5): 119–126.
- [27] 沈颖越, 宋婷婷, 蔡为明, 等. 基于质构仪质地多面分析法对香菇质地评价[J]. *菌物学报*, 2021, 40(5): 1180–1189.
- SHEN YY, SONG TT, CAI WM, *et al.* Evaluation on fruiting body texture of *Lentinula edodes* based on texture profile analysis [J]. *Mycosystema*, 2021, 40(5): 1180–1189.
- [28] 靳荣线, 李峰, 孔维丽, 等. 基于 TPA 法对十四种香菇质地的研究与评价[J]. *北方园艺*, 2023(20): 109–116.
- JIN RX, LI F, KONG WL, *et al.* Research and evaluation of texture of 14 kinds of *Lentinula edodes* based on TPA method [J]. *Northern Horticulture*, 2023(20): 109–116.
- [29] 李兴江, 王巧云, 李静红, 等. 黑豆渣粉对饼干品质的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 39(20): 152–158.
- LI XJ, WANG QY, LI JH, *et al.* Effect of black bean dregs powder on the quality of biscuits [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 39(20): 152–158.
- [30] 马媛媛, 陆玲鸿, 古咸彬, 等. 基于 TPA 的猕猴桃质地差异分析及贮藏性评价[J]. *果树学报*, 2021, 38(9): 1579–1589.
- MA YY, LU LH, GU XB, *et al.* Texture difference and storage characteristics evaluation based on texture profile analysis in kiwifruits [J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(9): 1579–1589.
- [31] 罗斌, 赵有斌, 尹学清, 等. 质构仪在果蔬品质评定中应用的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(5): 209–213.
- LUO B, ZHAO YB, YIN XQ, *et al.* Application progress of texture analyzer in the research of fruit and vegetable quality evaluation [J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(5): 209–213.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)