

基于灰色关联度和 DTOPSIS 法的香菇品种综合评价

狄英杰, 郭杰, 王亚光, 王炯, 张君, 刘小奎, 孙水娟, 杜适普

(三门峡市农业科学研究院 河南三门峡 472000)

摘要:为筛选出适合豫西地区种植的高产优质香菇品种,试验选取 24 个品种的 11 个主要农艺性状作为评价指标,采用灰色关联度和逼近理想解排序(DTOPSIS)2 种分析方法进行综合评价。结果表明,灰色关联度法排名与产量排名的相关性较弱($r=0.476$),其评价更关注性状的均衡性,而 DTOPSIS 法排名与产量排名呈极强相关性($r=0.941$),更接近高产优质的香菇育种目标,两种方法均能在一定程度上反映出香菇品种的综合表现,其中 DTOPSIS 法的 C_i 值最大差异率为 56.37%,高于灰色关联度法 G_i 值的最大差异率(24.17%),更能凸显品种间的差异和优劣,因此 DTOPSIS 法更适用于香菇品种的综合评价。综合两种分析方法的筛选结果,X15(德海 1 号)、X12(808-2)、X20(申香 215)综合性状较好,适宜在豫西地区推广应用。

关键词:香菇;灰色关联度;DTOPSIS;农艺性状;综合评价

中图分类号:S646.1² 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2025)12-063-08

Comprehensive evaluation of *Lentinula edodes* strains based on grey correlation degree and DTOPSIS method

DI Yingjie, GUO Jie, WANG Yaguang, WANG Jiong, ZHANG Jun, LIU Xiaokui, SUN Shuijuan, DU Shipu

(Sanmenxia Academy of Agricultural Sciences, Sanmenxia 472000, Henan, China)

Abstract: In order to screen out high-yield and high-quality *Lentinula edodes* varieties suitable for planting in western Henan, 11 major agronomic traits of 24 varieties were selected as evaluation indexes, and comprehensive evaluation was carried out by grey correlation degree and DTOPSIS. The results showed that the correlation between the ranking of grey correlation method and the ranking of yield was low($r=0.476$), and the evaluation paid more attention to the balance of traits. In contrast, the ranking of DTOPSIS method was significantly correlated with the ranking of yield($r=0.941$), which was closer to the breeding goal of high yield and high quality. Both methods could reflect the comprehensive performance of *Lentinula edodes* varieties to a certain extent. The maximum difference rate of C_i value of DTOPSIS method was 56.37 %, which was higher than the maximum difference rate of G_i value of grey correlation method(24.17%), indicating that the DTOPSIS method better highlight the differences and comparative advantages among varieties. Therefore, the DTOPSIS method is more suitable for comprehensive evaluation of *Lentinula edodes* varieties. Based on the screening results of both analytical methods, X15(Dehai No. 1), X12(808-2) and X20(Shenxiang 215) exhibited superior comprehensive traits and were recommended for local promotion and application.

Key words: *Lentinula edodes*; Grey correlation degree; DTOPSIS; Agronomic trait; Comprehensive evaluation

香菇(*Lentinula edodes*)是我国第一大食用菌品种,凭借丰富的营养价值与独特风味,深受消费者喜爱^[1-3]。2023 年我国香菇产量突破 1300 万 t,占食用菌总产量的 30.08%^[4],这一产业不仅成为农业经济的重要增长来源,更在保障食物供应多样性方面发挥重要作用^[5]。近年来,随着产业规模扩张与栽

培技术进步,消费市场对香菇产量、品质、适应性等性状的多元化需求持续升级。同时,当前香菇选育存在着品种同质化严重、高产与优质性状难以协同等问题,亟待通过科学的评价方法对种质资源进行系统筛选,以精准发掘综合性状优异的香菇品种^[6-7]。

收稿日期:2024-12-19;修回日期:2025-09-16

基金项目:河南省现代农业产业技术体系(HARS-22-08-Z2);三门峡市科技发展计划(2022002030)

作者简介:狄英杰,男,助理农艺师,研究方向为食用菌育种与栽培。E-mail:563554264@qq.com

通信作者:杜适普,男,推广研究员,研究方向为食用菌育种、栽培及推广。E-mail:smxsyj@163.com

灰色关联度法和逼近理想解排序法(简称DTOPSIS法)在多品种、多性状的全面考察与综合分析方面展现出明显优势。灰色关联度法通过量化动态系统中各目标序列与理想序列在变化趋势上的相似程度,来评价各因素的相对重要性或进行优劣排序^[8],已在香菇、杏鲍菇、羊肚菌、黑木耳等食用菌的综合评价中验证了其有效性^[9-12]。DTOPSIS法则基于评价对象与“理想解”和“负理想解”的相对距离进行加权排序^[13],虽在小麦、玉米、大豆等大宗作物评价研究上应用广泛^[14-16],但在食用菌领域,DTOPSIS法的应用尚处于起步阶段,目前仅见于刘欣怡^[17]对大球盖菇及韦春某等^[11]对羊肚菌的研究报道,尚未见将该方法应用于香菇品种综合评价的相关研究。

笔者以豫西地区“集中制棒+分散出菇”栽培模式下的冬季香菇品种比较试验为基础,选取24个品种的11个主要农艺性状作为评价指标,采用灰色关联度和DTOPSIS两种分析方法进行综合评价,旨在筛选出适宜当地栽培条件的高产优质香菇

品种,以期为香菇乃至其他食用菌种质评价与品种选育提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

参与研究的24个香菇品种由三门峡市农业科学院种质资源研究室保藏,具体名称及来源见表1。

1.2 试验设计

试验于2023年6月至2024年3月在河南金海生物有限公司(河南省三门峡市卢氏县文峪乡麻家湾香菇产业基地,海拔577 m)进行。母种培养基采用PDA配方,栽培料配方为:栎木屑79%,麸皮20%,石膏1%。选用规格为17 cm×55 cm×0.007 cm(折径×长度×厚度)的聚乙烯塑料袋制备菌棒,每棒装湿料2.7~2.8 kg(折干1.3 kg)。116 °C高温高压灭菌6 h,出锅冷却至常温后进行打穴接种,每棒打4穴,穴径3 cm,穴深4 cm。每个品种接种60棒,培养85~90 d后移入菇棚,采用完全随机排

表1 参试香菇品种及来源
Table 1 Test strains and sources of *Lentinula edodes*

品种编号 Strain number	品种名称 Strain name	来源 Source	品种编号 Strain number	品种名称 Strain name	来源 Source
X1	808-1	三门峡市农业科学院 Sanmenxia Academy of Agricultural Sciences	X13	金菇5号 Jingu 5	三门峡市农业科学院 Sanmenxia Academy of Agricultural Sciences
X2	豫香2号-1 Yuxiang 2-1	三门峡市农业科学院 Sanmenxia Academy of Agricultural Sciences	X14	鸿丰1号 Hongfeng 1	河南灵宝 Lingbao, Henan
X3	丰菇4号 Fenggu 4	河南卢氏 Lushi, Henan	X15	德海1号 Dehai 1	河南卢氏 Lushi, Henan
X4	L31	河南卢氏 Lushi, Henan	X16	灵仙1号 Lingxian 1	河南灵宝 Lingbao, Henan
X5	9608-1	三门峡市农业科学院 Sanmenxia Academy of Agricultural Sciences	X17	0912	河北平泉 Pingquan, Hebei
X6	申香235 Shenxiang 235	河南卢氏 Lushi, Henan	X18	雨花4号 Yuhua 4	河南泌阳 Biyang, Henan
X7	9608-2	河南卢氏 Lushi, Henan	X19	农香2号 Nongxiang 2	福建省菌物研究中心 Fujian Fungi Research Center
X8	平泉01 Pingquan 01	河北平泉 Pingquan, Hebei	X20	申香215 Shenxiang 215	驻马店市农业科学院 Zhumadian Academy of Agricultural Sciences
X9	德海9号-1 Dehai 9-1	河南灵宝 Lingbao, Henan	X21	向阳2号-2 Xiangyang 2-2	河南卢氏 Lushi, Henan
X10	向阳2号-1 Xiangyang 2-1	河南卢氏 Lushi, Henan	X22	德海10号 Dehai 10	河南卢氏 Lushi, Henan
X11	豫香2号-2 Yuxiang 2-2	山西万荣 Wanrong, Shanxi	X23	德海9号-2 Dehai 9-2	河南卢氏 Lushi, Henan
X12	808-2	河南卢氏 Lushi, Henan	X24	野生1号 Wild 1	四川平武 Pingwu, Sichuan

列,3次重复,使用的棚型为联栋薄膜大棚,按照常规方法进行发菌、转色和出菇管理。

1.3 测定指标

分别采用十字交叉法和划线法测定PDA培养基及木屑培养基上的菌丝生长速度^[18]。子实体生长至七八成熟时采收,记录前3潮的出菇时间、产量、优质菇比例和每棒成菇数,其中优质菇为菌盖直径大于5.5 cm,菇形圆整、伞形初开的香菇子实体。每个品种在第2潮选取10朵具有代表性的鲜菇,测量菌盖紧实度、菌盖直径、菌盖厚度、菌柄直径、菌柄长度和单菇鲜质量等农艺性状,所有测得的数据取平均值,测量方法参照NY/T 2560—2014《植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 香菇》^[19]。

1.4 分析方法

1.4.1 灰色关联度分析 设定参考品种为 X_0 ,根据香菇育种目标和生产实际,取参试品种各项农艺性状指标的最优值所构成的数列作为参考序列 $X_0(K)$,24个参试品种的各项农艺性状指标构成比较序列 $X_i(K)$,表示第*i*个品种的第*j*个性状,*K*为性状数,按照表2中11个性状的顺序依次用*K1*、*K2*、*K3*…*K11*表示。无量纲化处理与关联系数、关联度、权重和灰色综合评判值 G_i 的计算过程均参照张凡等^[20]的研究,通过比较 G_i 值的大小确定各品种的优劣顺序。

1.4.2 DTOPSIS法分析 根据DTOPSIS法的基本原理^[13],分析序列的确定和无量纲化处理均与灰色关联度法相同,随后建立加权决策矩阵,通过计算参试品种与“理想解”和“负理想解”之间的距离,得到相对接近度 C_i ,其值越大,则综合品质越优。

1.4.3 相关性分析 采用Microsoft Excel 2019对试验数据进行统计处理,采用IBM SPSS 22.0进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同香菇品种主要农艺性状比较

24个供试香菇品种的11项农艺性状指标考察结果如表2所示,各品种在PDA培养基上的菌丝生长速度范围在2.06~4.76 mm·d⁻¹,其中菌丝生长速度最快的是X20,最慢的是X3;木屑培养基上的菌丝平均生长速度范围在2.60~3.60 mm·d⁻¹,其中X14菌丝生长速度最快,X22最慢;菌盖紧实度结实的有6个品种,分别是X4、X10、X11、X12、X13和X15,菌盖紧实度疏松的有4个品种,分别是X3、X19、X21和X24,其余14个品种菌盖紧实度适中;

菌盖厚度范围在11.86~20.26 mm,其中X9菌盖最厚,X2菌盖最薄;菌盖直径范围在44.65~86.94 mm,其中X17菌盖最大,X4菌盖最小;菌柄长度范围在32.22~57.16 mm,其中X3菌柄最长,X11菌柄最短;菌柄直径范围在9.96~20.48 mm,其中X17菌柄最粗,X19菌柄最细;单菇鲜质量范围在13.36~63.06 g,其中X17单菇鲜质量最大,X19单菇鲜质量最小。参试品种前3潮菇的平均单棒产量范围在132.63~584.38 g,其中X18单棒产量最高,其次为X20(584.08 g),X4单棒产量最低;平均每棒成菇数最高的是X19,为23.67个,最低的是X9,为7.00个;X4优质菇率最高,达到93.84%,X19优质菇率最低,为55.44%。

参试香菇品种各农艺性状变异系数也存在一定差异,表现为成菇数>菌盖紧实度>单菇鲜质量>单棒产量>菌盖厚度>菌丝生长速度(PDA)>菌盖直径>菌柄直径>优质菇率>菌柄长度>菌丝生长速度(木屑),其中成菇数的变异系数最大,达到35.06%,菌丝生长速度(木屑)的变异系数最小,为8.03%,表明不同品种在产量与品质性状上存在明显的特异性,为特异性筛选提供了基础。

2.2 灰色关联度分析

参考序列 $X_0(K)$ 和比较序列 $X_i(K)$ 如表2所示。对原始数据进行无量纲化处理的结果见表3,处理后每个性状值在0~1之间。在考察的11个性状中,菌柄长度和菌柄直径采用逆向指标测度,其他性状采用正向指标测度。表4为各性状对应的关联系数和权重,关联系数越大,表示与参考序列越接近,反之则越疏远。可以看出,参试香菇品种各性状与参考序列间的关系密切程度表现为菌柄长度(*K6*)>优质菇率(*K11*)>菌丝生长速度(木屑)(*K2*)>菌丝生长速度(PDA)(*K1*)>菌盖厚度(*K4*)>菌盖紧实度(*K3*)>单棒产量(*K9*)>菌盖直径(*K5*)>菌柄直径(*K7*)>成菇数(*K10*)>单菇鲜质量(*K8*),因此,在香菇的品种选育与综合评价过程中,除产量这一关键因素外,还需充分考虑菌柄长度、优质菇率以及菌丝生长速度等性状对香菇综合品质的影响。

2.3 DTOPSIS法分析

根据香菇优质高产的主要育种目标并结合实际生产需要,分别对各性状赋予不同的权重 W_j [$W_j \in \{0, 1\}$, $\sum_{j=1}^{11} W_j = 1$]。11个性状按照表2顺序赋予的权重值依次为0.02、0.08、0.12、0.07、0.06、0.05、0.05、0.10、0.25、0.05、0.15。根据公式 $R_j = X_i(K)W_j$,

表 2 24 个香菇品种子实体主要农艺性状
Table 2 Main agronomic traits of fruiting body of 24 *Lentinula edodes* strains

品种 Strain	菌丝生长 速度(PDA) Mycelial growth rate (PDA)/ (mm·d ⁻¹)	菌丝生长 速度(木屑) Mycelial growth rate (sawdust)/ (mm·d ⁻¹)	菌盖 紧实度 Pileus tightness	菌盖 厚度 Pileus thickness/ mm	菌盖 直径 Pileus diameter/ mm	菌柄 长度 Stipe length/ mm	菌柄 直径 Stipe diameter/ mm	单菇鲜 质量 Single mushroom fresh mass/g	单棒 产量 Yield of single stick/g	成菇数 Number of finished mushroom	优质 菇率 High quality yield/%
X1	4.31	3.06	2	15.60	63.98	42.68	14.86	36.86	411.47	11.33	85.24
X2	3.98	2.90	2	11.86	60.44	38.59	14.68	31.71	519.58	16.67	73.78
X3	2.06	2.76	1	18.94	62.34	57.16	15.75	35.04	401.27	12.00	67.60
X4	3.49	2.92	3	12.77	44.65	35.69	14.84	18.79	132.63	7.00	93.84
X5	4.20	3.16	2	15.75	64.90	41.72	17.29	35.66	348.55	9.67	80.15
X6	3.65	2.61	2	15.45	81.08	45.55	18.28	52.44	480.20	9.33	83.20
X7	3.81	2.98	2	12.79	71.53	43.05	13.90	43.04	301.23	7.33	78.99
X8	2.50	3.13	2	14.62	70.38	38.80	15.16	38.81	566.73	15.00	85.55
X9	3.44	2.85	2	20.26	61.28	40.62	16.37	40.02	280.78	7.00	83.18
X10	3.76	3.16	3	12.83	74.73	42.68	15.75	45.72	380.15	8.00	83.48
X11	3.90	2.63	3	13.75	57.12	32.22	13.63	26.40	374.61	14.00	74.17
X12	3.84	3.08	3	13.12	68.02	39.04	13.31	38.10	547.13	14.33	66.49
X13	3.53	3.05	3	14.39	62.67	36.83	16.04	32.24	233.70	7.33	86.71
X14	3.90	3.60	2	16.86	58.76	42.35	17.12	27.48	349.43	13.00	82.53
X15	3.95	2.94	3	14.29	64.36	35.41	13.85	30.01	547.90	18.33	80.80
X16	3.75	2.73	2	18.63	58.13	39.83	16.02	41.43	461.52	11.33	68.36
X17	4.02	2.79	2	19.62	86.94	41.23	20.48	63.06	459.82	7.33	88.68
X18	4.31	3.22	2	14.99	61.72	46.68	12.50	29.33	584.38	20.67	57.90
X19	4.44	3.35	1	15.00	46.43	34.36	9.96	13.36	319.13	23.67	55.44
X20	4.76	2.75	2	12.00	66.89	38.68	13.62	31.74	584.08	19.00	64.08
X21	4.72	2.82	1	12.35	61.81	32.28	13.45	27.41	356.07	13.33	71.43
X22	3.71	2.60	2	17.00	57.35	35.25	15.42	26.33	375.63	14.33	87.69
X23	4.38	3.05	2	16.67	69.67	32.95	12.12	34.27	442.77	13.67	78.02
X24	3.32	2.86	1	20.11	54.60	33.63	16.17	23.70	310.53	13.67	55.59
均值 Mean value	3.82	2.96	2.08	15.40	63.74	39.47	15.02	34.29	407.05	12.81	76.37
标准差 Standard deviation	0.60	0.24	0.64	2.56	9.23	5.47	2.13	10.33	114.47	4.49	10.64
变异系数 Coefficient of variation/%	15.65	8.03	30.72	16.65	14.49	13.86	14.18	30.13	28.12	35.06	13.93
X_0	4.76	3.60	3.00	20.26	86.94	32.22	9.96	63.06	584.38	23.67	93.84

注:为便于统计分析,将菌盖紧实度疏松赋值为1,适中赋值为2,结实赋值为3。

Note: For statistical analysis purposes, pileus tightness was categorized and assigned numerical values as follows, loose=1, moderate=2, firm=3.

计算得到决策矩阵 R (表 5)。由矩阵 R 中每列数据的最大值和最小值分别构成该性状的理想解和负理想解,则 11 个性状的理想解与负理想解数列分别为:
 $X_i^+ = [0.020\ 0, 0.080\ 0, 0.120\ 0, 0.070\ 0, 0.060\ 0, 0.050\ 0, 0.050\ 0, 0.100\ 0, 0.250\ 0, 0.050\ 0, 0.150\ 0]; X_i^- = [0.008\ 7, 0.057\ 8, 0.040\ 0, 0.041\ 0, 0.030\ 8, 0.028\ 2, 0.024\ 3, 0.024\ 6, 0.056\ 7, 0.014\ 8, 0.088\ 6]。$

2.4 G_i 值、 C_i 值及产量排名分析

不同分析方法的排名结果如表 6 所示,灰色关联度法 G_i 值排名从高到低依次为: X17、X15、X23、

X12、X20、X19、X18、X10、X11、X8、X13、X1、X14、X6、X21、X4、X22、X2、X9、X5、X16、X7、X24、X3; DTOPSIS 法 C_i 值排名从高到低依次为: X15、X8、X12、X20、X18、X17、X6、X2、X16、X23、X10、X1、X11、X22、X5、X14、X3、X7、X21、X9、X13、X19、X24、X4; 产量排名从高到低依次为: X18、X20、X8、X15、X12、X2、X6、X16、X17、X23、X1、X3、X10、X22、X11、X21、X14、X5、X19、X24、X7、X9、X13、X4。由以上排名情况可知, C_i 值排名和产量排名情况具有较高的相似性,排名前 5 位的品种相同,与

表3 无量纲化处理结果
Table 3 Dimensionless processing results

品种 Strain	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11
X1	0.905 5	0.850 0	0.666 7	0.770 0	0.735 9	0.754 9	0.670 3	0.584 5	0.704 1	0.478 7	0.908 4
X2	0.836 1	0.805 6	0.666 7	0.585 4	0.695 2	0.834 9	0.678 5	0.502 9	0.889 1	0.704 3	0.786 2
X3	0.432 8	0.766 7	0.333 3	0.934 8	0.717 0	0.563 7	0.632 4	0.555 7	0.686 7	0.507 0	0.720 4
X4	0.733 2	0.811 1	1.000 0	0.630 3	0.513 6	0.902 8	0.671 2	0.298 0	0.227 0	0.295 7	1.000 0
X5	0.882 4	0.877 8	0.666 7	0.777 4	0.746 5	0.772 3	0.576 1	0.565 5	0.596 4	0.408 5	0.854 1
X6	0.766 8	0.725 0	0.666 7	0.762 6	0.932 6	0.707 4	0.544 9	0.831 6	0.821 7	0.394 2	0.886 6
X7	0.800 4	0.827 8	0.666 7	0.631 3	0.822 8	0.748 4	0.716 5	0.682 5	0.515 5	0.309 7	0.841 8
X8	0.525 2	0.869 4	0.666 7	0.721 6	0.809 5	0.830 4	0.657 0	0.615 4	0.969 8	0.633 7	0.911 7
X9	0.722 7	0.791 7	0.666 7	1.000 0	0.704 9	0.793 2	0.608 4	0.634 6	0.480 5	0.295 7	0.886 4
X10	0.789 9	0.877 8	1.000 0	0.633 3	0.859 6	0.754 9	0.632 4	0.725 0	0.650 5	0.338 0	0.889 6
X11	0.819 3	0.730 6	1.000 0	0.678 7	0.657 0	1.000 0	0.730 7	0.418 6	0.641 0	0.591 5	0.790 4
X12	0.806 7	0.855 6	1.000 0	0.647 6	0.782 4	0.825 3	0.748 3	0.604 2	0.936 3	0.605 4	0.708 5
X13	0.741 6	0.847 2	1.000 0	0.710 3	0.720 8	0.874 8	0.620 9	0.511 3	0.399 9	0.309 7	0.924 0
X14	0.819 3	1.000 0	0.666 7	0.832 2	0.675 9	0.760 8	0.581 8	0.435 8	0.597 9	0.549 2	0.879 5
X15	0.829 8	0.816 7	1.000 0	0.705 3	0.740 3	0.909 9	0.719 1	0.475 9	0.937 6	0.774 4	0.861 0
X16	0.787 8	0.758 3	0.666 7	0.919 5	0.668 6	0.808 9	0.621 7	0.657 0	0.789 8	0.478 7	0.728 5
X17	0.844 5	0.775 0	0.666 7	0.968 4	1.000 0	0.781 5	0.486 3	1.000 0	0.786 9	0.309 7	0.945 0
X18	0.905 5	0.894 4	0.666 7	0.739 9	0.709 9	0.690 2	0.796 8	0.465 1	1.000 0	0.873 3	0.617 0
X19	0.932 8	0.930 6	0.333 3	0.740 4	0.534 0	0.937 7	1.000 0	0.211 9	0.546 1	1.000 0	0.590 8
X20	1.000 0	0.763 9	0.666 7	0.592 3	0.769 4	0.833 0	0.731 3	0.503 3	0.999 5	0.802 7	0.682 9
X21	0.991 6	0.783 3	0.333 3	0.609 6	0.711 0	0.998 1	0.740 5	0.434 7	0.609 3	0.563 2	0.761 2
X22	0.779 4	0.722 2	0.666 7	0.839 1	0.659 7	0.914 0	0.645 9	0.417 5	0.642 8	0.605 4	0.934 5
X23	0.920 2	0.847 2	0.666 7	0.822 8	0.801 4	0.977 8	0.821 8	0.543 5	0.757 7	0.577 5	0.831 4
X24	0.697 5	0.794 4	0.333 3	0.992 6	0.628 0	0.958 1	0.616 0	0.375 8	0.531 4	0.577 5	0.592 4
X_0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

表4 各性状的关联度及权重
Table 4 Correlation degree and weight of the traits

指标 Index	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11
关联度 Correlation degree	0.694 3	0.698 9	0.628 0	0.651 8	0.614 4	0.724 4	0.564 4	0.487 2	0.615 6	0.492 7	0.704 3
权重 Weight	0.101 0	0.101 6	0.091 3	0.094 8	0.089 3	0.105 4	0.082 1	0.070 9	0.089 5	0.071 7	0.102 4

G_i 值排名情况差别较大。其中X15 G_i 值排名第2、 C_i 值排名第1、产量排名第4,综合表现最为优异,其次为X12(G_i 值第4、 C_i 值第3、产量第5)和X20(G_i 值第5、 C_i 值第4、产量第2),以上3个品种无论在产量排名还是综合性状排名均位列前5位,可作为当地主推品种。X4、X24和X3在3项指标排名中相对靠后,综合表现较差,不建议在生产上推广。此外,X17的 G_i 值排名第1,但 C_i 值(第6)和产量(第9)排名稍逊;X18产量排名第1、 C_i 值第5,但 G_i 值(第7)中等偏上,表明X18为高产品种,而X17虽然产量不占优势,但菇型较优,优质菇比例高,可作为香菇育种亲本材料加以利用。

2.5 G_i 值、 C_i 值及产量排名相关性分析

对各分析方法的排名结果进行Pearson相关性分析(表7),结果表明,DTOPSIS法的 C_i 值排名与产量排名呈极强相关($r=0.941, P<0.01$),而灰色关联度法的 G_i 值排名与产量排名呈中等相关($r=0.476, P<0.05$),说明DTOPSIS法在捕捉香菇品种产量潜力方面具有显著优势。 G_i 值与 C_i 值排名呈中等相关($r=0.562, P<0.01$),反映了两种方法评价侧重点的差异。

3 讨论与结论

香菇品种选育需兼顾产量、品质、抗逆性等多

表5 决策矩阵
Table 5 Decision matrix

品种 Strain	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$K7$	$K8$	$K9$	$K10$	$K11$
X1	0.018 1	0.068 0	0.080 0	0.053 9	0.044 2	0.037 7	0.033 5	0.062 9	0.176 0	0.023 9	0.136 3
X2	0.016 7	0.064 4	0.080 0	0.041 0	0.041 7	0.041 7	0.033 9	0.046 6	0.222 3	0.035 2	0.117 9
X3	0.008 7	0.061 3	0.040 0	0.065 4	0.043 0	0.028 2	0.031 6	0.048 4	0.171 7	0.025 3	0.108 1
X4	0.014 7	0.064 9	0.120 0	0.044 1	0.030 8	0.045 1	0.033 6	0.027 9	0.056 7	0.014 8	0.150 0
X5	0.017 6	0.070 2	0.080 0	0.054 4	0.044 8	0.038 6	0.028 8	0.058 9	0.149 1	0.020 4	0.128 1
X6	0.015 3	0.058 0	0.080 0	0.053 4	0.056 0	0.035 4	0.027 2	0.082 3	0.205 4	0.019 7	0.133 0
X7	0.016 0	0.066 2	0.080 0	0.044 2	0.049 4	0.037 4	0.035 8	0.068 3	0.128 9	0.015 5	0.126 3
X8	0.010 5	0.069 6	0.080 0	0.050 5	0.048 6	0.041 5	0.032 8	0.056 5	0.242 4	0.031 7	0.136 7
X9	0.014 5	0.063 3	0.080 0	0.070 0	0.042 3	0.039 7	0.030 4	0.062 7	0.120 1	0.014 8	0.133 0
X10	0.015 8	0.070 2	0.120 0	0.044 3	0.051 6	0.037 7	0.031 6	0.073 1	0.162 6	0.016 9	0.133 4
X11	0.016 4	0.058 4	0.120 0	0.047 5	0.039 4	0.050 0	0.036 5	0.042 1	0.160 3	0.029 6	0.118 6
X12	0.016 1	0.068 4	0.120 0	0.045 3	0.046 9	0.041 3	0.037 4	0.060 3	0.234 1	0.030 3	0.106 3
X13	0.014 8	0.067 8	0.120 0	0.049 7	0.043 3	0.043 7	0.031 0	0.049 6	0.100 0	0.015 5	0.138 6
X14	0.016 4	0.080 0	0.080 0	0.058 3	0.040 6	0.038 0	0.029 1	0.043 4	0.149 5	0.027 5	0.131 9
X15	0.016 6	0.065 3	0.120 0	0.049 4	0.044 4	0.045 5	0.036 0	0.045 9	0.234 4	0.038 7	0.129 2
X16	0.015 8	0.060 7	0.080 0	0.064 4	0.040 1	0.040 4	0.031 1	0.062 5	0.197 4	0.023 9	0.109 3
X17	0.016 9	0.062 0	0.080 0	0.067 8	0.060 0	0.039 1	0.024 3	0.100 0	0.196 7	0.015 5	0.141 8
X18	0.018 1	0.071 6	0.080 0	0.051 8	0.042 6	0.034 5	0.039 8	0.049 5	0.250 0	0.043 7	0.092 6
X19	0.018 7	0.074 4	0.040 0	0.051 8	0.032 0	0.046 9	0.050 0	0.024 6	0.136 5	0.050 0	0.088 6
X20	0.020 0	0.061 1	0.080 0	0.041 5	0.046 2	0.041 6	0.036 6	0.054 2	0.249 9	0.040 1	0.102 4
X21	0.019 8	0.062 7	0.040 0	0.042 7	0.042 7	0.049 9	0.037 0	0.045 3	0.152 3	0.028 2	0.114 2
X22	0.015 6	0.057 8	0.080 0	0.058 7	0.039 6	0.045 7	0.032 3	0.044 3	0.160 7	0.030 3	0.140 2
X23	0.018 4	0.067 8	0.080 0	0.057 6	0.048 1	0.048 9	0.041 1	0.051 7	0.189 4	0.028 9	0.124 7
X24	0.013 9	0.063 6	0.040 0	0.069 5	0.037 7	0.047 9	0.030 8	0.042 6	0.132 8	0.028 9	0.088 9
X_i^+	0.020 0	0.080 0	0.120 0	0.070 0	0.060 0	0.050 0	0.050 0	0.100 0	0.250 0	0.050 0	0.150 0
X_i^-	0.008 7	0.057 8	0.040 0	0.041 0	0.030 8	0.028 2	0.024 3	0.024 6	0.056 7	0.014 8	0.088 6

重目标性状,而传统单一指标评价体系难以全面反映品种综合价值^[21]。笔者通过灰色关联度法与DTOPSIS法的联合应用,系统评价了24个香菇品种的农艺性状表现,两种分析方法在保留数据差异性的同时实现了多维度量化分析,既弥补了单一指标评价的局限性,又通过方法学互补提升了结果可靠性,为香菇乃至其他食用菌种质评价与品种选育提供了理论参考。

进一步比较两种分析方法可知,灰色关联度法通过计算性状间关联度得到的加权权重较为均衡,11个性状对应权重值范围在0.070 9~0.105 4,如品种X17虽产量排名第9,但因其菌盖厚度(19.62 mm)、优质菇率(88.68%)和单菇鲜质量(63.06 g)等品质性状突出, G_i 值排名第1,显示出该方法对非产量性状的包容性。而DTOPSIS法赋予各性状权重值范围在0.02~0.25,强化了其中单棒产量和优质菇率等性状的权重,得到的 C_i 值排名与产

量排名相关系数达0.941,明显高于 G_i 值的0.476,因此与灰色关联度法相比,DTOPSIS法更契合高产优质的育种目标,其56.37%的最大差异率也明显高于灰色关联度法排名结果的24.17%,表明DTOPSIS法在区分品种优劣时灵敏度更高,更适用于香菇品种的综合评价。这一结论与韦春某等^[11]对羊肚菌、张慧敏等^[22]对大豆的研究结果一致,印证了多指标综合评价相较于单一产量排名的科学性,后者77.30%的极端差异率易掩盖其他关键性状价值。

权重分配直接影响评价结果^[23]。在本研究中,DTOPSIS法基于育种目标和生产经验预设权重的做法参照了前人关于谷子、马铃薯、草莓等作物综合评价的研究^[24-26],虽能精准匹配产业需求,但存在主观偏差风险;灰色关联度法通过关联度计算权重时,单棒产量权重(0.089 5)在11个性状中仅排第7,与香菇产业对高产稳产的核心需求存在脱节。这一现象与杨昆等^[27]的研究相呼应,揭示出权重计

表6 不同评价方法排序结果比较
Table 6 Comparison of ranking results from different evaluation methods

排序 Rank	灰色关联度法 Grey correlation degree			DTOPSIS			产量 Yield		
	品种 Strain	G_i 值 G_i value	差异率 Difference rate/%	品种 Strain	C_i 值 C_i value	差异率 Difference rate/%	品种 Strain	单棒产量 Yield of single stick/g	差异率 Difference rate/%
1	X17	0.712 0	0.00	X15	0.745 3	0.00	X18	584.38	0.00
2	X15	0.702 0	1.40	X8	0.737 5	1.05	X20	584.08	0.05
3	X23	0.682 4	4.16	X12	0.734 4	1.46	X8	566.73	3.02
4	X12	0.671 2	5.73	X20	0.699 0	6.21	X15	547.90	6.24
5	X20	0.665 0	6.60	X18	0.687 2	7.80	X12	547.13	6.37
6	X19	0.664 9	6.62	X17	0.682 5	8.43	X2	519.58	11.09
7	X18	0.658 6	7.50	X6	0.679 9	8.77	X6	480.20	17.83
8	X10	0.653 1	8.27	X2	0.661 1	11.30	X16	461.52	21.02
9	X11	0.652 6	8.34	X16	0.616 5	17.28	X17	459.82	21.31
10	X8	0.644 8	9.44	X23	0.611 9	17.90	X23	442.77	24.23
11	X13	0.633 3	11.05	X10	0.589 4	20.92	X1	411.47	29.59
12	X1	0.627 1	11.92	X1	0.583 3	21.74	X3	401.27	31.33
13	X14	0.626 5	12.01	X11	0.536 8	27.98	X10	380.15	34.95
14	X6	0.625 8	12.11	X22	0.515 8	30.79	X22	375.63	35.72
15	X21	0.623 8	12.39	X5	0.480 4	35.54	X11	374.61	35.90
16	X4	0.622 2	12.61	X14	0.473 8	36.43	X21	356.07	39.07
17	X22	0.618 0	13.20	X3	0.470 1	36.92	X14	349.43	40.21
18	X2	0.613 4	13.85	X7	0.421 7	43.42	X5	348.55	40.36
19	X9	0.612 0	14.04	X21	0.416 7	44.09	X19	319.13	45.39
20	X5	0.607 4	14.69	X9	0.402 9	45.94	X24	310.53	46.86
21	X16	0.606 0	14.89	X13	0.397 7	46.64	X7	301.23	48.45
22	X7	0.588 4	17.36	X19	0.355 8	52.26	X9	280.78	51.95
23	X24	0.586 9	17.57	X24	0.340 5	54.31	X13	233.70	60.01
24	X3	0.539 9	24.17	X4	0.325 2	56.37	X4	132.63	77.30

表7 G_i 值、 C_i 值及产量排名结果相关性分析Table 7 Correlation analysis of G_i value, C_i value and yield ranking results

比较组合 Compare combinations	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level
G_i 值排名- C_i 值排名 G_i value ranking- C_i value ranking	0.562	$P<0.01$
G_i 值排名-产量排名 G_i value ranking-yield ranking	0.476	$P<0.05$
C_i 值排名-产量排名 C_i value ranking-yield ranking	0.941	$P<0.01$

算易受性状变异幅度干扰。建议下一步采用主客观融合策略以避免单一方法带来的偏差,如刘芹等^[28]引入模糊数学验证主观权重,杨禹伟等^[29]通过博弈论整合层次分析法与熵权法结果,可有效提升权重合理性。值得注意的是,过度赋予产量指标权重可能使综合评价退化为产量排序,偏离了综合评

价的初衷。

综上所述,采用灰色关联度法和DTOPSIS法均能在一定程度上反映出香菇品种的综合表现,两种分析方法共同筛选出X15、X12和X20综合表现优异的品种,兼具菌龄短、产量高、品质好的优良特性,可在河南卢氏县及类似生态区推广应用;X4、X24和X3综合表现较差,不建议应用于生产;而产量最高的X18与品质最优的X17,可借助杂交技术进一步挖掘利用二者的优良性状。后续研究需开展多点区域试验以验证品种稳定性,并引入分子标记技术解析优良品种遗传基础^[30]。此外,DTOPSIS法可进一步结合市场需求动态优化权重体系,以更好地适应多元化育种目标,从而为产业升级提供更精准的决策支持。

参考文献

- [1] XIANG Q J,ADIL B,CHEN Q,et al. Shiitake mushroom (*Lentinula edodes* (Berk.) Sing.) breeding in China[J]. Advances

- in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops, 2021, 26: 443-476.
- [2] 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.
- [3] 刘晓,闫语婷.香菇的营养价值及综合利用现状与前景[J].食品工业,2017,38(3):207-210.
- [4] 中国食用菌协会.2023年度全国食用菌统计调查结果分析[J].中国食用菌,2025,44(1):120-129.
- [5] 曹斌,高博.我国香菇产业发展现状、趋势和对策研究[J].食药用菌,2025,33(4):242-251.
- [6] 鲍大鹏.食用菌杂交育种中的技术策略(上)[J].食用菌学报,2024,31(6):1-16.
- [7] 董浩然,于海龙,姜宁,等.中国食用菌工厂化生产发展现状及趋势[J].食药用菌,2024,32(1):1-9.
- [8] 冯绍宽.灰色系统理论在农业科学中的应用及前景[J].天津农业科学,1990(1):36-39.
- [9] 刘启燕,王卓仁,肖扬,等.应用灰色关联度分析筛选香菇优良杂交子[J].食用菌学报,2010,17(1):26-31.
- [10] 潘慧,徐章逸,边银丙.灰色关联度法在杏鲍菇优良杂交菌株筛选中的应用[J].食用菌学报,2010,17(2):22-25.
- [11] 韦春某,莫忠妹,何荣健,等.基于灰色关联度分析和DTOPSIS法对羊肚菌品种的综合评价[J].中国食用菌,2025,44(3):20-29.
- [12] 吴润泽,苏林贺,曾伟民,等.黑木耳单孢杂交菌株筛选与灰色关联度分析[J].黑龙江大学自然科学学报,2024,41(2):207-217.
- [13] 龙腾芳,郭克婷.DTOPSIS法的程序设计及其在作物品种评价中的应用[J].中国农学通报,2004,20(3):252-254.
- [14] 杨春玲,侯军红,宋志均,等.DTOPSIS法综合评价黄淮小麦新品种初探[J].山东农业科学,2010(8):21-23.
- [15] 许波,王成业,张海申,等.DTOPSIS法综合评价玉米新品种的研究[J].安徽农业科学,2004(5):872-874.
- [16] 卢为国,李卫东,梁慧珍,等.DTOPSIS法综合评价大豆新品种的初步探索[J].中国油料作物学报,1998(3):23-27.
- [17] 刘欣怡.适宜稻菇轮作模式的大球盖菇优良杂交菌株选育初步研究[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [18] 黄万兵,侯娣,周陈力,等.香菇单核菌丝生长速度差异的相关基因分析[J].菌物学报,2023,42(10):2111-2118.
- [19] 中华人民共和国农业部.植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 香菇:NY/T 2560—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [20] 张凡,薛鑫,刘国涛,等.基于灰色关联度分析法和聚类分析法筛选小麦高产优质新品种(系)的研究[J].中国农学通报,2020,36(27):6-13.
- [21] 林范学,梁宝东,冯磊,等.利用多元统计分析方法评价香菇菌株的农艺性状[J].食用菌学报,2018,25(1):20-28.
- [22] 张慧敏,耿若飞,王二伟,等.灰色关联度分析和DTOPSIS法在综合评价大豆新品种(系)中的应用[J].大豆科技,2022(2):14-21.
- [23] 杨宇.多指标综合评价中赋权方法评析[J].统计与决策,2006(13):17-19.
- [24] 张晓申,韩燕丽,樊永强,等.基于灰色关联度和DTOPSIS法对谷子区域试验的综合评价[J].种子,2022,41(9):121-126.
- [25] 张秀芬,何文,莫周美,等.基于DTOPSIS法对广西马铃薯品种(系)的综合评价[J].中国瓜菜,2020,33(10):75-80.
- [26] 李文砚,韦优,孔方南,等.DTOPSIS法在草莓品种综合评价中的应用研究[J].植物生理学报,2018,54(5):925-930.
- [27] 杨昆,吴才文,覃伟,等.DTOPSIS法和灰色关联度法在甘蔗新品种综合评价中的应用比较[J].西南农业学报,2015,28(4):1542-1547.
- [28] 刘芹,孔维丽,崔筱,等.基于模糊数学和聚类分析的香菇品种综合品质评价[J].中国瓜菜,2021,34(11):37-46.
- [29] 杨禹伟,陈华,杨宇,等.基于组合赋权的Dtopsis法在土壤肥力评价中的应用[J].北方园艺,2017(21):129-133.
- [30] 张瑞颖,胡丹丹,左雪梅,等.分子标记技术在食用菌遗传育种中的应用[J].中国食用菌,2011,30(1):3-7.