

基于灰色关联度分析的羊肚菌增产肥料筛选与综合评价

李 闯, 王 青, 王礼伟, 郭小山, 汪国莲*

江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安

收稿日期: 2025年10月6日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月17日

摘 要

为筛选适用于羊肚菌栽培的专用增产肥料, 本研究于播种前在土壤中分别施用9种不同肥料, 以不施肥处理为对照, 通过测定羊肚菌产量及相关形态指标, 结合灰色关联度分析法进行综合评价。结果表明, 不同肥料对羊肚菌产量和菇形均有显著影响, 氮磷钾肥和磷酸二氢钾处理增产效果最为显著, 分别比CK增产35.96%和23.86%。灰色关联度分析显示, 氮磷钾肥、磷酸二氢钾、稻壳炭、硝硫基高钾结果肥、氨基酸有机肥和黄腐酸钾的加权关联系数较高, 综合性状优良。综上, 氮磷钾肥与磷酸二氢钾可作为羊肚菌增产栽培的优选肥料, 在提升产量的同时兼顾菇形品质。

关键词

羊肚菌, 增产肥料, 灰色关联度分析, 产量, 菇形

Screening and Comprehensive Evaluation of Yield-Increasing Fertilizers for *Morchella* Based on Grey Relation Analysis

Chuang Li, Qing Wang, Liwei Wang, Xiaoshan Guo, Guolian Wang*

Huaiyin Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Province Xuhuai District, Huai'an Jiangsu

Received: October 6, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 17, 2025

Abstract

To screen specialized yield-increasing fertilizers suitable for the cultivation of *Morchella*, nine different fertilizers were applied to the soil before sowing in this study. A comprehensive evaluation

*通讯作者。

文章引用: 李闯, 王青, 王礼伟, 郭小山, 汪国莲. 基于灰色关联度分析的羊肚菌增产肥料筛选与综合评价[J]. 农业科学, 2025, 15(11): 1354-1359. DOI: 10.12677/hjas.2025.1511170

was conducted by measuring the yield and related morphological indicators of *Morchella* and combining with Grey Relation Analysis (GRA), using a non-fertilized treatment as the control. The results indicated that different fertilizers had significant effects on the yield and mushroom morphology of *Morchella*. The nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer and potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) treatment showed the most significant yield-increasing effects, increasing yield by 35.96% and 23.86% compared to CK, respectively. GRA revealed that NPK fertilizer, KH_2PO_4 , rice husk biochar, high-potassium nitrate-sulfur-based compound fertilizer, amino acid organic fertilizer, and potassium fulvic acid had higher weighted correlation coefficients, indicating superior comprehensive traits. In conclusion, NPK fertilizer and KH_2PO_4 can be selected as preferred fertilizers for yield-increasing cultivation of *Morchella*, effectively enhancing yield while concurrently considering mushroom morphology quality.

Keywords

Morchella, Yield-Increasing Fertilizer, Grey Relation Analysis, Yield, Mushroom Morphology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

羊肚菌(*Morchella* Dill. exPers.)是羊肚菌属真菌的统称[1],它是一种在全世界范围内都广泛存在的食药两用型真菌。羊肚菌富含多种氨基酸、呈鲜物质、芳香成分,其味道鲜美、风味独特、口感脆嫩,深受国内外消费者的喜爱[2][3]。同时现代医学研究表明,羊肚菌含有多种生物活性成分,具有调节机体免疫力、抗疲劳、抗癌、抗肿瘤、抗菌消炎、降血脂等药用功能[4]。因其栽培周期短、经济价值高,在我国已成为用于精准扶贫、农民致富增收的首选“短平快”食用菌品种[5]。从2012至今,我国羊肚菌人工栽培面积由3000亩增至30万亩[1],10年间增长了100余倍,栽培区域遍布全国20余个省份。然而,羊肚菌规模化生产中仍存在产量不稳、基础研究薄弱等问题,制约其产业化发展[6]。

食用菌的高产稳产与其对栽培基质的营养利用效率密切相关。通过优化基质配方或外源添加营养成分,可显著提高食用菌的产量与品质[7]。目前,国外已在食用菌增产添加剂研发与应用方面取得显著成效,而国内特别是羊肚菌专用增产肥料的研究尚属空白。为此,本研究选取已报道对羊肚菌栽培具有增产效果的9种肥料[8][9],系统比较了这9种肥料施用对羊肚菌产量和菇形的影响,并运用灰色关联度分析法筛选适宜羊肚菌增产的专用肥料,以期对羊肚菌高效栽培提供理论支持与技术依据。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

供试羊肚菌菌株为六妹羊肚菌(*Morchella sextelata*, Mel-6),由江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所提供。供试肥料包括稻壳炭、泥炭土、草木灰、氮磷钾复合肥(18-18-18)、硝硫基高钾肥、氨基酸有机肥、黄腐酸钾、磷酸二氢钾、硝酸钾冲施肥,均由淮安市绿康生物科技有限公司提供。

2.2. 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,共设10个处理(9种肥料+CK),每处理3次重复。每小区面积 6 m^2 ($5\text{ m}\times 1.2\text{ m}$),区组间留40 cm过道。于播种前1天,参考已报道文献中施用量[8][9],将各肥料按表1所

示用量均匀施入畦面土壤，用微耕机旋耕 15 cm 深混匀。

Table 1. Fertilizer treatments and application rates

表 1. 肥料处理及施用量

编号	处理	施用量/m ²
处理 1	稻壳炭	2 kg
处理 2	泥炭土	2 kg
处理 3	草木灰	2 k g
处理 4	氮磷钾肥(18-18-18)	10 g
处理 5	硝硫基高钾结果肥	30 g
处理 6	氨基酸有机肥	5 g
处理 7	黄腐酸钾	32 g
处理 8	磷酸二氢钾	30 g
处理 9	硝酸钾冲施肥	30 g
对照	CK	

2.3. 栽培管理

采用设施大棚栽培，播种量为 400 斤/亩，条播后覆土浇水。7~10 天后铺设外源营养袋(2500 袋/亩)，覆盖黑色地膜保温保湿。外源营养袋被充分吸收变软，菌丝生理成熟后揭膜，通风 2 天，浇催菇水。出菇期控制棚温 15℃~22℃，空气相对湿度 75%~90%。子囊果成熟后及时采收。

2.4. 指标测定

每小区采收后记录鲜菇数量与总重量，计算出菇密度与产量。每小区选取 3 朵典型子实体，用天平与游标卡尺测量菇盖重量、长度、直径、厚度及菇柄重量、长度、直径、厚度。使用 SPSS 20 软件对各性状进行描述性统计与方差分析，并采用 Duncan 方法进行多重比较分析，采用变异系数(CV)来衡量各性状变异幅度。

2.5. 灰色关联度分析

Table 2. Trait indicators and weights

表 2. 各性状指标及权重

编号	性状指标	指标权重	指标性质
X1	鲜菇密度(个/m ²)	0.2	正向指标
X2	鲜菇产量(g/m ²)	0.3	正向指标
X3	菇盖重量(g)	0.1	正向指标
X4	菇盖长度(mm)	0.05	正向指标
X5	菇盖直径(mm)	0.05	正向指标
X6	菇盖厚度(mm)	0.05	正向指标
X7	菇柄重量(g)	0.1	反向指标
X8	菇柄长度(mm)	0.05	反向指标
X9	菇柄直径(mm)	0.05	反向指标
X10	菇柄厚度(mm)	0.05	反向指标

参照韦春某(2025)方法进行灰色关联度分析[10]。以产量与菇形指标构建比较数列，经正向化、无量

纲化处理后,以各指标最大值构建参考数列。指标权重的确定基于专家咨询结合羊肚菌栽培目标与市场偏好进行赋值。其中,鲜菇密度(X1)与鲜菇产量(X2)权重最高(0.2~0.3),因其直接反映栽培增产效果;菇盖相关性状(X3~X6)权重次之(0.05~0.1),因其影响菇体商品性;同时市场调研表明,羊肚菌商品以菇盖肥大、菇柄短小为优,菇柄过长或过粗会降低商品等级和市场接受度[11],菇柄相关性状(X7~X10)被定义为反向指标,权重均为0.05~0.1。计算关联系数($\rho=0.5$)及加权关联系数(权重见表2),按关联度排序评价各肥料处理的综合表现。

3. 结果与分析

3.1. 不同肥料对产量与菇形的影响

各处理产量与菇形指标变异系数为3.90%~26.03%,其中出菇密度(X1)、产量(X2)和菇柄厚度(X10)变异最大(表3)。氮磷钾肥、磷酸二氢钾、氨基酸有机肥等处理显著提高产量与出菇密度,其中氮磷钾肥增产35.96%,出菇密度提高27.27%。草木灰、硝酸钾冲施肥和泥炭土无显著增产效果。菇形方面,硝酸钾冲施肥、黄腐酸钾等处理有助于菌盖伸长;黄腐酸钾与硝硫基高钾肥可增加菌盖厚度;多数肥料能缩短菌柄长度、减小菌柄直径,其中氨基酸有机肥、黄腐酸钾和硝酸钾冲施肥效果最佳。

Table 3. Results of trait measurements for each treatment

表 3. 各处理性状测定结果

处理	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
处理 1	89 ± 32 ^a	812.3 ± 362.3 ^b	20.6 ± 3 ^b	74.7 ± 11.6	41 ± 5.6	7.5 ± 2.2	12.1 ± 6.4 ^a	38.1 ± 12.5	29.2 ± 6.4	2.3 ± 0.6 ^c
处理 2	41 ± 21 ^d	543.6 ± 413.2 ^d	19.6 ± 1.2 ^b	71 ± 5.7	40.3 ± 5.1	9 ± 1.7	9.6 ± 2.4 ^c	38.5 ± 5.3	26.8 ± 5	2 ± 0.4 ^c
处理 3	42 ± 18 ^d	641.4 ± 131.1 ^c	22.5 ± 5.2 ^{ab}	68.6 ± 9.7	45 ± 8	9.1 ± 0.9	11.2 ± 2.7 ^a	40.8 ± 6.4	30.5 ± 5.3	2.8 ± 0.9 ^b
处理 4	70 ± 25 ^{ab}	1008.6 ± 220.4 ^a	21.3 ± 3.3 ^{ab}	75.7 ± 10.3	40.4 ± 5.5	7.7 ± 1.5	10.4 ± 2 ^b	44.8 ± 6	26.4 ± 2.1	2.4 ± 0.6
处理 5	60 ± 12 ^{bc}	825.4 ± 182.5 ^b	23.5 ± 0.7 ^a	74.7 ± 9.4	44.7 ± 3.8	9.2 ± 0.8	9.5 ± 3 ^c	40.1 ± 4.8	30 ± 5.5	1.9 ± 0.4 ^c
处理 6	63 ± 16 ^b	878.9 ± 239.6 ^b	19.3 ± 4.2 ^c	71.1 ± 7.9	38.2 ± 5.2	7.8 ± 1.6	9.7 ± 4.3 ^c	37.4 ± 8	27.5 ± 3.6	2.3 ± 0.6 ^c
处理 7	53 ± 3 ^{cd}	800.5 ± 221 ^b	22.3 ± 4.9 ^{ab}	75.7 ± 11.9	41.8 ± 4.6	9.5 ± 2.4	10.5 ± 4.2 ^b	37.5 ± 9	26.5 ± 3.4	3.4 ± 1.1 ^a
处理 8	58 ± 13 ^c	918.8 ± 25.1 ^a	22.5 ± 4.8 ^{ab}	73.6 ± 9.3	43.3 ± 6.1	8.5 ± 2.1	8.5 ± 2.5 ^d	40.7 ± 7.9	29.1 ± 5.6	2 ± 0.5 ^c
处理 9	41 ± 19 ^d	574.2 ± 318 ^d	23.5 ± 7.7 ^a	78.6 ± 13.4	41.2 ± 5.5	8.3 ± 2.4	9.8 ± 4.8 ^{bc}	37.6 ± 10.3	26.6 ± 3.8	2.2 ± 0.4 ^c
CK	55 ± 30 ^c	741.8 ± 129.3 ^{bc}	26.4 ± 7 ^a	73.2 ± 8.4	45.4 ± 9.4	8.8 ± 2.1	11 ± 4.1 ^a	43.2 ± 8.2	29.4 ± 4.5	2.4 ± 0.7 ^c
变异系数	26.03%	19.41%	9.49%	3.90%	5.65%	8.14%	10.05%	6.42%	5.66%	18.77%

注:表中数据表示为“均值 ± 标准差”。数据上的字母标注表示多重比较结果,标注有相同的字母说明各处理间没有显著差异,小写字母表示表示 $p < 0.05$ 。

3.2. 灰色关联度分析

鉴于方差分析在区分处理效应上的局限性，本研究进一步采用灰色关联度分析法，该方法对数据分布要求宽松，且能综合权衡多个性状，更适用于评价如羊肚菌栽培此类变异较大的复杂系统。灰色关联度分析结果显示，氮磷钾肥、磷酸二氢钾、稻壳炭、硝硫基高钾结果肥、氨基酸有机肥和黄腐酸钾的加权关联系数较高(表 4)，表明这些处理在产量与菇形综合表现上接近理想配方。实际产量也验证了上述结果，氮磷钾肥处理产量最高(1008.6 g/m²)，磷酸二氢钾次之(918.8 g/m²)。

Table 4. Grey correlation coefficients and yield rankings for each formulation
表 4. 各配方灰色关联度及产量排序

配方	加权关联系数	关联度	产量(g/m ²)	产量排序
氮磷钾肥	0.078	1	1008.6	1
磷酸二氢钾	0.075	2	918.8	2
稻壳炭	0.074	3	812.3	5
硝硫基高钾结果肥	0.071	4	825.4	4
氨基酸有机肥	0.068	5	878.9	3
黄腐酸钾	0.066	6	800.5	6
CK	0.065	7	741.8	7
硝酸钾冲施肥	0.061	8	574.2	9
泥炭土	0.058	9	543.6	10
草木灰	0.057	10	641.4	8

4. 讨论与结论

本研究通过田间试验与灰色关联分析相结合，系统评价了 9 种肥料对羊肚菌产量与菇形的调控效应。结果表明，氮磷钾肥与磷酸二氢钾在增产与改善菇形方面表现突出，可作为羊肚菌专用增产肥料的优选品种。灰色关联度分析法能有效综合多性状指标，避免单一指标评价的局限性，适用于食用菌栽培配方的优化筛选。后续研究可进一步探讨不同肥料组合、施用时期及与土壤微生物互作对羊肚菌产量与品质的影响，为羊肚菌绿色高效栽培提供更全面的技术支撑。

基金项目

淮安市农业科学研究院科技发展基金项目(HNY202207)。

参考文献

[1] 邵改革, 张瑞颖. 羊肚菌生物学和栽培技术研究进展[J]. 中国食用菌, 2025, 44(3): 1-11+19.

[2] 刘兴勇, 林涛, 尹本林, 等. 环境和生长阶段对羊肚菌氨基酸的呈味影响[J]. 精细化工, 2018, 35(12): 2058-2064.

[3] 范婷婷, 赵晓燕, 李晓贝, 等. 人工栽培和野生羊肚菌游离氨基酸主成分分析及综合评价[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 295-302.

[4] 蔡英丽, 马晓龙, 刘伟. 羊肚菌营养价值与保健功能综述[J]. 食药用菌, 2021, 29(1): 20-27.

[5] 高红, 党志琴, 党志文. 精准扶贫视角下羊肚菌资源可持续发展策略[J]. 中国食用菌, 2021, 40(3): 159-163.

[6] 赵琪, 吕梦岚, 李路, 等. 我国羊肚菌产业的“诱惑”与“陷阱”[J]. 菌物研究, 2021, 19(4): 232-237.

[7] 刘秀明, 陈强, 邬向丽, 等. 国内外食用菌增产添加物研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(1): 120-125.

-
- [8] 杜璨, 王锋, 李应涛, 等. 不同施肥类型下设施羊肚菌产量表现及经济效益[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(2): 69-74.
 - [9] 刘瑶琳. 六妹羊肚菌大田栽培优良菌株筛选及高产栽培研究[D]. [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
 - [10] 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.
 - [11] 农业农村部. NY/T 4344-2023 羊肚菌等级规格[S]. 北京: 中国农业出版社, 2023.