生物资源　2025,47(3):251～258
Biotic Resources

研究报告

DOI:10.14188/j.ajsh.20241206001

适宜北方温室栽培的铁皮石斛优质种源评价

李虹阳[1,2],黄雨倩[1],李　欣[1],胡　青[1*],任建武[1]

(1. 北京林业大学 生物科学与技术学院,北京 100083;
2. 中国检验认证集团山东有限公司,山东 青岛 266073)

摘要:品种选育工作对铁皮石斛产业提质增效具有基础性支撑作用和促进作用。本研究系统地检测了6个铁皮石斛优质种源的品相性状(生物学特性)、品质性状(有效成分的含量)和区域适应性(抗逆特性),进行不同地理种源种间差异比较,运用层次分析法建立优良品种筛选体系。结果表明,铁皮石斛不同种质茎部成分存在差异:R1种质呈现最高多糖积累量(30.41%),R2种质具备最大甘露糖含量(25.47%)而R5种质粗纤维含量(8.21%)显著高于其他种源。在冬季自然低温条件下,R6种质表现出最优抗逆性,其冻害指数仅6.19,单丛萌发新芽数达8个,显示较强生态适应性。通过层次分析法综合评价,R1种质在鲜食产品开发维度获得最高评分(8.860 2),而R6是盆栽型的最佳种质,获得9.673 8的综合评价值,成为园艺栽培优选材料。通过综合评估,筛选出了适于石斛药材生产的最佳目标品种,为新优种质资源繁育与栽培奠定基础。

关键词:铁皮石斛;种源;品种;层次分析法

中图分类号:S567.23　　文献标志码:A　　文章编号:2096-3491(2025)03-0251-08

Evaluation of high-quality provenances of *Dendrobium officinale* suitable for greenhouse cultivation in northern China

Li Hongyang[1,2], Huang Yuqian[1], Li Xin[1], Hu Qing[1*], Ren Jianwu[1]

(1. School of Biological Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. China Inspection and Certification Group Shandong Co., Ltd., Qingdao 266073, Shandong, China)

Abstract: The variety breeding work has a basic supporting role and a promoting effect on the quality and efficiency of the *Dendrobium officinale* industry. The morphological traits (biological characteristics), quality traits (active ingredient content) and regional adaptability (stress resistance) of 6 high-quality provenances of *Dendrobium officinale* were systematically studied. The differences among different geographical provenances were compared, and the screening system of excellent varieties was established by analytic hierarchy process. The experimental data showed that the stem components of different germplasms of *Dendrobium officinale* were different: R1 germplasm presented the highest polysaccharide accumulation (30.41%), R2 germplasm possessed the maximum mannose content (25.47%) while R5 germplasm had significantly higher crude fiber content (8.21%) than other seed sources. Under the conditions of natural low temperature in winter, R6 germplasm showed the best stress resistance, with a frost damage index of only 6.19 and a single clump sprouting of 8 new shoots, demonstrating strong ecological adaptability. Through the comprehensive evaluation of analytic hierarchy process (AHP), R1 germplasm obtained the highest score (8.860 2) in the development dimension of fresh food products, while R6 was the best germplasm of potted type and obtained the comprehensive evaluation value of

收稿日期:2024-12-06　修回日期:2025-04-11　接受日期:2025-06-09
作者简介:李虹阳(1991-),女,硕士,研究方向:药用植物研究,E-mail:ccicsd_li@163.com
*通讯联系人:胡青(1979-),女,硕士,副教授,研究方向:植物天然产物,E-mail:89770936@qq.com
基金项目:国家重点研发计划(2023YFD2201800)

引用格式:李虹阳,黄雨倩,李欣,等.适宜北方温室栽培的铁皮石斛优质种源评价[J].生物资源,2025,47(3):251-258.
Li Hongyang,Huang Yuqian,Li Xin,et al. Evaluation of high-quality provenances of *Dendrobium officinale* suitable for greenhouse cultivation in northern China[J]. Biotic Resources,2025,47(3):251-258.

9.673 8, which became the preferred material for horticultural cultivation. Through comprehensive evaluation, the best target varieties suitable for the production of *Dendrobium* medicinal materials were screened out, which laid a foundation for the breeding and cultivation of new high-quality resources.

Key words: *Dendrobium officinale*; provenance; cultivar; analytic hierarchy process

0 引 言

铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura et Migo)是兰科(Orchidaceae)珍贵药材,能滋阴清热、益胃生津、润肺止咳[1],具有抗肿瘤、抗衰老、抑制癌症、增强机体免疫力等药理作用[2-4]。《中华人民共和国药典》在2015年与2020年的修订版本中,均对铁皮石斛实施了专项单列收录[1],继其药用价值获得法定确认后,国家卫生健康委员会联合国家市场监督管理总局于2023年通过专项文件,将其正式列入食药同源物质管理清单。因此,铁皮石斛相关健康产业得到了极大的推动。然而随着铁皮石斛健康产业的快速扩张,种源混乱、种质退化及产品品质不稳定等问题逐渐显现,成为制约行业可持续发展的瓶颈[5-6]。

在推动铁皮石斛标准化基地建设的过程中,种质创新选育成为核心攻关方向。尽管现有文献在药用品质表征领域积累了大量数据,但受限于技术路径单一化及评价维度狭窄等瓶颈,目前仍未建立系统化的铁皮石斛质量分级标准体系。

本研究从铁皮石斛品种选育及适宜产业化的角度出发,系统地研究6个优质种源的品相性状(生物学特性)、品质性状(有效成分的含量)和区域适应性(抗逆特性),运用层次分析法[7-8]将定性分析与定量分析有机结合,建立优良品种筛选体系,最终得到目标品种,为铁皮石斛优良品种评价与选育、优质中药材的培育提供科学依据。

1 材料与仪器

1.1 材料

本研究基于铁皮石斛自然分布特征及生态适应性,选取浙江、安徽、江西等主产省区作为种源收集范围。通过实地调研和专家咨询,重点筛选具有显著地理梯度差异的种源:涵盖海拔900~1 450 m的山区(反映垂直分布特征)、年均温14.5~18.4 ℃(横跨亚热带至暖温带过渡区)以及年降雨量1 350~1 882 mm(湿润至半湿润气候区)的典型生境。最终选定6个代表性优质种源(表1),分别编号为R1、R2、R3、R4、R5、R6,其来源地兼具传统栽培产区(如浙江庆元、武义)和新兴引种区(如安徽大别山),且涵盖不同纬度梯度。试验材料统一栽培于博展智慧北京农业科技发展有限公司良种培育基地,采用日光温室标准化管理,控制水肥条件一致。

1.2 主要仪器和试剂

试剂:无水葡萄糖标准品、*D*-盐酸氨基葡萄糖标准品、*D*-甘露糖标准品购于上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇购于天津市永大化学试剂有限公司;PMP购于北京华扬致成科技有限公司、甲醇购于天津市光复精细化工研究所;浓硫酸、苯酚、盐酸、氢氧化钠、乙腈、三氯甲烷、乙酸铵、氢氧化钾、乙醚购于北京化工厂。

仪器设备:植物比色卡、精密色差仪购于深圳市三恩驰科技有限公司;游标卡尺和直尺购于上海美耐特实业有限公司;Handy PEA便携式植物荧光仪购于英国Hansatech公司;MNMF-1818型粉碎机购于湖北碧山机械有限公司;新世纪T6紫外分光光度计购于北京普析通用仪器有限公司;DZTW调温电热套购于北京市永光明医疗仪器有限公司;H/T16MM台式高速离心机购于湖南赫西仪器设备有限公司;LC-2010AHT高效液相色谱仪购于日本岛津公司;SX2马弗炉购于上海雷韵试验仪器制造有限公司。

表1 铁皮石斛优质种源栽培区基本信息

Table 1 Basic information of high-quality provenances of *Dendrobium officinale*

编号	来源地	纬度	经度	海拔/m	平均气温/℃	年平均降雨量/mm
R1	浙江庆元	27.5°N~27.7°N	118.8°E~119.5°E	1 320	17.4	1 760
R2	江西玉山	28.4°N~28.7°N	117.9°E~118.2°E	1 240	18.0	1 841
R3	江西鹰潭	28.2°N~28.5°N	116.6°E~117.5°E	1 080	18.4	1 882
R4	浙江武义	28.8°N~29.0°N	119.5°E~119.9°E	1 210	17.1	1 474
R5	浙江义乌	29.3°N~29.5°N	119.8°E~120.3°E	900	17.0	1 350
R6	安徽大别山	31.0°N~31.5°N	112.7°E~117.2°E	1 450	14.5	1 832

2 实验方法

2.1 形态特征研究

本研究在温室栽培条件下，系统观测不同种源铁皮石斛的形态学指标，涵盖茎、叶、花3个器官的15项农艺性状：茎部参数包括直立生长特性、形态学特征（长度、粗度、茎节长度及显著度）、茎颜色与茎表面斑点是否明显；叶片性状涉及叶形分类（依据长宽比阈值3.0划分为窄叶型与宽叶型）、叶色表现及尺寸特征（叶长、叶宽）；花朵特征主要测定花色、唇瓣斑块的形状与颜色。

研究方法采用定性与定量相结合的观测体系：在定性分析中，植物比色卡与精密色差仪联用实现颜色指标的标准化测定，植株直立性、茎杆构型、叶形及唇瓣斑块形状等形态特征依据植物形态学描述规范进行鉴定，采用视觉评估法对茎表斑点数量与茎节显著度等表型特征进行主观评定；定量检测方面，茎长参数采用直尺计量，而茎粗、节间长度及叶片长宽等维度指标则使用游标卡尺实施精确测量[7]。铁皮石斛种源量化性状指标应用SPSS 21.0统计软件对其进行差异性分析，实验设计采用系统抽样法：按种源分类随机选取6个样本丛，每丛设置3株生物学重复完成各项指标测定。

2.2 有效成分含量的测定

新鲜铁皮石斛→留茎去叶→清洗→沥干→切成0.5～1 cm小段→干燥处理（烘箱60 ℃，烘干至恒重）→粉碎→装于密封袋中记录种源编号，置于干燥器中备用。

根据《中华人民共和国药典》（2020年版一部）相关规范[1]，茎中多糖含量可以通过苯酚-硫酸比色法进行提取和定量分析，而甘露糖含量则采用同版药典规定的高效液相色谱法（HPLC）进行提取和定量分析；采用标准化的粗纤维定量分析方法，具体操作参照《食品中粗纤维的测定》（GB/T 5009.10—2003）技术规范执行[9]。针对各检测指标（多糖、甘露糖、粗纤维），按种源分类建立独立检测体系，所有样本均设置6组平行试验以控制分析误差。

2.3 区域适应性

2015年12月至2019年3月，对6个种源的越冬冻害情况和受冻恢复生长情况进行调查，采用Handy PEA便携式植物荧光仪和CIRAS-2便携式光合作用测定系统进行测定，记录并计算各种源的冻害指数和萌发新芽数。根据冻害情况将其分为5个等级。0级：植株正常，无冻害现象（光系统Ⅱ的最大光化学效率$F_v/F_m \geqslant 0.828$，叶片性能指数PI Inst.$\geqslant$3.5；光合作用碳同化每日周期阶段Ⅱ，北京冬季上午10:00～11:00，净光合作用速率$P_n \geqslant 1.6$ μmol/m²/s；1级：植株仅个别叶片叶尖出现局部冻害（$F_v/F_m \geqslant 0.808$，PI Inst.$\geqslant$1.6，$P_n \geqslant 0.8$ μmol/m²/s）；3级：植株半数以下叶片叶尖受冻，受冻叶片呈现局部萎缩或焦枯（$F_v/F_m \geqslant 0.78$，PI Inst.$\geqslant$1.0，$P_n \geqslant 0.3$ μmol/m²/s）；5级：植株有半数以上叶片受冻，受冻叶局部或大部分萎缩、焦枯，但心叶正常（$F_v/F_m \geqslant 0.58$，PI Inst.$\geqslant$0.5，$P_n \geqslant -0.8$ μmol/m²/s）；7级：植株叶片全部受冻，受冻叶局部或大部分萎缩、焦枯，心叶微受冻害，尚能恢复生长（$F_v/F_m \leqslant 0.58$，PI Inst.$\leqslant$0.5，$P_n \leqslant -0.8$ μmol/m²/s）。冻害指数=100×∑（各等级受害株数×代表级值）/（总调查株数×冻害最重等级代表级值）。

2.4 优良品种综合评价与筛选体系的建立

层次分析法既包含主观逻辑判断与分析，又体现了定量分析的优势，是一种将定性分析与定量分析有效融合的决策分析方法。该决策方法近年来被逐步引入植物遗传资源评估领域，为种质筛选和良种选育提供了科学量化工具[10]。

1）建立递阶层次结构。根据铁皮石斛的种质特性和选种目标，参考专家意见，本研究构建了层次化评估体系将目标层（A）分为鲜食型（A1）与盆栽型（A2）两大维度。基于系统分析原则，建立了3个约束层（C），分别是品相性状（C1）、品质性状（C2）、区域适应性（C3）。选取8个关键参数构建评价体系：在品相性状维度包含了茎杆构型（P1）、叶片特征（P2）及花形态（P3）；品质性状维度涵盖多糖含量（P4）、甘露糖含量（P5）和粗纤维含量（P6）；区域适应性维度包括抗寒性（P7）和单丛萌发新芽数（P8）等生物学指标，具体见表2。

2）构造两两比较判断矩阵并进行层次单排序与检验。对于约束层和指标层中影响上层目标的各因素，运用成对比较法和九级标度法构建判断矩阵：分别建立约束层对目标层（A-C）以及指标层对约束层（C-P）的对比关系，最终形成包含鲜食型与盆栽型两个应用方向的8个判断矩阵（各含4个）。利用特征根法计算权向量，排序并进行一致性检验。

3）层次总排序与检验。为实现最终目标，需要从上而下逐层计算各层因素对目标的合成权重，并进行总排序和检验。

4）种源评分标准的确定。基于鲜食与观赏用途的铁皮石斛规模化生产需求，综合文献分析、专家论证及实地调研数据，制定评分标准，见表3。

表2 铁皮石斛种源评价体系的递阶层次结构

Table 2 Hierarchical structure of provenance evaluation system of *Dendrobium officinale*

A(目标层)	C(约束层)	P(指标层)
A1(鲜食型)	C1(品相性状)	P1(茎杆构型),P2(叶片特征),P3(花形态)
	C2(品质性状)	P4(多糖含量),P5(甘露糖含量),P6(粗纤维含量)
	C3(区域适应性)	P7(抗寒性),P8(单丛萌发新芽数)
A2(盆栽型)	C1(品相性状)	P1(茎杆构型),P2(叶片特征),P3(花形态)
	C2(品质性状)	P4(多糖含量),P5(甘露糖含量),P6(粗纤维含量)
	C3(区域适应性)	P7(抗寒性),P8(单丛萌发新芽数)

表3 铁皮石斛种源具体指标的评分标准

Table 3 Scoring criteria for specific indicators of *Dendrobium officinale* provenances

评价指标	评分标准			
	4分	6分	8分	10分
茎杆构型	矮杆细茎型(较细,短或呈弯曲状)长杆细茎型(圆柱形,细长或呈弯曲状)	矮杆粗茎型(短,一般粗)	匍匐粗茎型(匍匐,纺锤形,一般长,粗壮)	直立,纺锤粗茎型(纺锤形,粗壮,一般长)长杆粗茎型(圆柱形,粗壮而长)
叶片特征	长披针形,呈深绿色,具多紫色斑点	长披针形,呈绿色或深绿色,具少量紫色斑点	卵圆形或宽披针形,呈绿色或深绿色,具少量紫色斑点	卵圆形,呈绿色,无紫色斑点
花形态	花量少,淡黄绿色,唇瓣斑点为暗紫色,分布不美观	花量一般,淡黄绿色,唇瓣斑点为暗紫色,分布不够美观	花量一般,黄绿色,唇瓣斑点为紫色,分布美观	花量大,黄绿色,唇瓣斑点颜色鲜艳,分布美观
多糖含量	<25%	[25%,28%)	[28%,30%)	≥30%
甘露糖含量	<15%	[15%,20%)	[20%,25%)	≥25%
粗纤维含量	≥8%	[6%,8%)	[4%,6%)	<4%
冻害指数	≥13%	[10%,13%)	[7%,10%)	<7%
单丛发芽数	≤3	(3,5]	(5,7]	>7

3 结果与分析

3.1 不同种源铁皮石斛形态特征比较

通过形态特征研究,可以概括出6个种源的定性性状见表4。由表可知,茎杆构型有直立与匍匐、圆柱形与纺锤形之分,颜色各不相同;叶形有长披针形、宽披针形与卵圆形,这些都是鉴定品种是否具备优质观赏特性的关键参数。

根据表5的种源性状测定数据,ANOVA检验揭示不同铁皮石斛种源间存在显著形态分化。茎部

表4 不同种源铁皮石斛定性性状特征的比较

Table 4 Comparison of qualitative traits of *Dendrobium officinale* from different provenances

编号	直立性	茎杆构型	叶片特征	花形态
R1	直立	青绿色,很少有紫色斑点,圆柱形	叶形狭长,长披针形,呈绿色,无紫色斑点,叶背面青绿色	花淡黄绿色,唇瓣紫色斑点少,片状分布
R2	匍匐	紫绿色,紫色斑点多,纺锤形	宽披针形,呈深绿色,少量紫色斑点,部分叶片叶背面具多紫色斑点,且叶缘呈紫红色	花黄绿色,唇瓣有紫红色斑点,点状分布
R3	直立	暗绿色,紫色斑点较多,纺锤形	卵圆形,呈绿色,无紫色斑点,叶背面为青绿色	花量少,黄绿色,唇瓣有暗紫色斑点,点状分布
R4	直立	紫红色,紫色斑点多,圆柱形	长披针形,呈深绿色,少量紫色斑点,部分叶片叶背面具多紫色斑点,且叶缘为紫红色	花量大,黄绿色,唇瓣暗紫红色斑点多,片状分布
R5	直立	黄绿色,紫色斑点稍多,圆柱形	宽披针形,呈绿色,无紫色斑点,叶背面为青绿色	秋花,淡黄绿色,唇瓣有紫红色斑点,点状分布
R6	直立	深绿色,紫色斑点很少,呈纺锤形	卵圆形,呈深绿色,无紫色斑点,叶背面为青绿色	花量大,黄绿色,唇瓣有鲜紫红斑点,片状分布

表5 不同种源铁皮石斛定量性状特征的比较

Table 5 Comparison of quantitative traits of *Dendrobium officinale* from different provenances

编号	茎长/cm	茎粗/mm	茎节长/cm	叶长/cm	叶宽/cm
R1	17.95 ± 3.27^{Bb}	5.88 ± 0.58^{Aa}	1.86 ± 0.31^{Aa}	5.05 ± 0.70^{AaB}	1.62 ± 0.22^{Aa}
R2	13.84 ± 2.97^{CcDd}	6.24 ± 0.74^{Aa}	1.47 ± 0.28^{Bb}	4.26 ± 0.48^{bC}	1.51 ± 0.27^{AaBbc}
R3	12.63 ± 1.71^{Dd}	4.43 ± 0.66^{Bb}	1.17 ± 0.23^{Bc}	3.78 ± 0.53^{Cc}	1.42 ± 0.21^{ABbc}
R4	23.75 ± 2.93^{Aa}	4.09 ± 0.57^{BbCc}	1.95 ± 0.30^{Aa}	5.18 ± 0.65^{Aa}	1.38 ± 0.28^{Bc}
R5	15.65 ± 2.14^{BCc}	3.57 ± 0.36^{Cc}	1.39 ± 0.27^{Bbc}	4.46 ± 0.71^{BbC}	1.49 ± 0.23^{AaBbc}
R6	15.17 ± 1.62^{Cc}	4.61 ± 0.70^{Bb}	1.41 ± 0.25^{Bbc}	4.19 ± 0.44^{bC}	1.53 ± 0.21^{AaBb}
平均值	16.50±4.40	4.80±1.12	1.54±0.38	4.49±0.75	1.49±0.24

注：大写字母表示$P<0.01$，小写字母表示$P<0.05$。

Note: Capital letters indicate $P<0.01$ level, and lowercase letters indicate $P<0.05$ level.

形态学指标（茎长、茎粗、茎节长）和叶长参数均呈现显著的组间差异（$P<0.05$），而叶片横向生长维度（叶宽）未达到统计学显著水平，$P(0.092)>0.05$。方差齐性检验证实各指标在组间满足方差同质性假设（$P>0.05$），因此可以应用多重比较检验进行分析。

多重比较结果：茎长指标，所有种源间两两比较均存在显著性差异，其中R4与R3分别为最大、最小值种源；茎粗维度，R1与R2组间、R3与R6组间未呈现显著差异；茎节长特征，R1与R4组间、R5与R6组间差异不显著，最大值见于R4，最小值见于R3；叶长参数，仅R2与R6组间无显著差异，最高值种源为R4；叶宽性状，R2与R5种源间差异均未达显著水平。

3.2 不同种源铁皮石斛有效成分含量比较

铁皮石斛的药用品质与其多糖成分密切相关，作为该植物的核心活性物质，多糖物质通过免疫平衡调节机制协同抗氧化途径（涉及自由基清除、抗氧化酶系统的激活及脂质过氧化抑制反应），在生物膜保护和延缓组织衰老进程中发挥双重生物调控效应[11-12]，是影响铁皮石斛品质的关键因素之一。从结构组成方面来看，甘露糖在多糖单体的构成里占据主要比例，而多糖的单糖组成分析，是多糖质量控制环节里一项关键的依据[13-14]。《中华人民共和国药典》（2010年版）制定了以多糖和甘露糖为质量标准进行品质控制的规定[1]，而粗纤维含量测定可用于注重口感的鲜食型铁皮石斛产品开发和品种选育。

如表6所示，通过单因素方差检验对铁皮石斛6个种源茎部有效成分含量进行比较分析，方差分析结果显示：多糖、甘露糖及粗纤维含量在种源间均呈现极显著差异（$P<0.05$）。方差齐性检验表明，3个指标在6个种源间满足方差同质性假设（$P>0.05$），因此可以应用多重比较检验进行分析。进一步多重比较表明，所有种源的多糖含量两两比较均存在统计学显著性差异，其中R1显著高于R4、R5等种源；甘露糖含量，仅R1与R2组间差异不显著；粗纤维含量，R1、R4和R6组间未达显著水平，而R5含量显著高于其他种源。

表6 不同种源铁皮石斛茎中有效成分含量的比较

Table 6 Comparison of the content of effective components in the stems of *Dendrobium officinale* from different provenances

编号	多糖/%	甘露糖/%	粗纤维/%
R1	30.41 ± 2.64^{Aa}	24.35 ± 1.13^{Aa}	4.62 ± 0.57^{Cc}
R2	28.74 ± 2.73^{AaBb}	25.47 ± 0.93^{Aa}	3.60 ± 0.44^{Dd}
R3	25.14 ± 2.34^{Ccd}	17.67 ± 1.67^{Dd}	6.76 ± 0.88^{Bb}
R4	22.81 ± 2.26^{Dd}	18.80 ± 1.73^{CcDd}	4.68 ± 0.54^{Cc}
R5	23.55 ± 1.95^{Cd}	21.53 ± 1.05^{Bb}	8.21 ± 0.93^{Aa}
R6	26.39 ± 2.02^{BbCc}	19.66 ± 1.70^{BCc}	4.88 ± 0.44^{Cc}
平均值	26.17±3.52	21.24±3.18	5.46±1.68

注：大写字母表示$P<0.01$，小写字母表示$P<0.05$。

Note: Capital letters indicate $P<0.01$ level, and lowercase letters indicate $P<0.05$ level.

3.3 不同种源铁皮石斛区域适应性比较

6个种源冻害情况和恢复生长情况的比较见表7。方差分析结果表明，6个种源的冻害情况显著性水平为$0.000<0.05$，即存在显著差异。Levene方差齐性检验显示，冻害相关因变量的组间方差齐性成立（$P=0.705>0.05$），表明2个指标在6个种源间的方差均满足齐性假设，故方差齐性假设下的多重比较进行分析。多重比较结果也说明了各种源两两比较差异均显著。

结果显示，抗寒性排序：R6>R2>R1>R4>R5>R3，表明高海拔种源（R6）通过长期低温选择获得了更强的抗逆性；恢复能力：R6的单丛萌发新芽数高于其他种源，这一发现为北方温室栽培的品种选

择提供了直接依据。

表7 不同种源铁皮石斛受冻害情况和恢复生长情况的比较

Table 7 Comparison of freezing injury and recovery growth of *Dendrobium officinale* from different provenances

编号	冻害指数	单丛萌发新芽数/个
R1	8.10 ± 1.99^{CcDd}	7.00 ± 1.58^{AaBb}
R2	7.62 ± 1.56^{CDd}	6.80 ± 1.64^{AaBb}
R3	14.29 ± 2.06^{Aa}	4.40 ± 1.14^{Cc}
R4	10.24 ± 1.63^{BbCc}	6.80 ± 1.48^{AaBb}
R5	12.38 ± 0.78^{AaBb}	5.40 ± 1.14^{BbCc}
R6	6.19 ± 1.23^{Dd}	8.20 ± 0.84^{Aa}
平均值	9.80±3.21	6.43±1.74

注:大写字母表示$P<0.01$,小写字母表示$P<0.05$。

Note: Capital letters indicate $P<0.01$ level, and lowercase letters indicate $P<0.05$ level.

3.4 判断矩阵、层次单排序与一致性检验结果

通过一致性比率(CR)验证分析显示,8个评估矩阵的CR值均低于0.1的阈值(CR<0.1),表明各评价指标之间具有一致性关系,见表8和表9。

3.5 层次总排序与一致性检验结果

基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的综合权重分析表明,不同栽培目标的核心评价因子权重排序存在差异。在以食用价值为导向的品种选育中,主成分权重排序依次为多糖含量、抗寒性和粗纤维含量,其贡献度排序符合药用成分优先的选育逻辑;在以观赏价值为导向的品种选育中,主成分权重排序依次为萌发新芽数、茎秆构型和抗寒性,凸显观赏价值取向下的生物量积累动态调控决策特征。上述因子是品种选育的核心调控要素(CR<0.1),其权重分布揭示了不同应用场景下性状选择的优先级差异。建议在种质资源筛选中,鲜食型品种需强化多糖代谢相关基因的挖掘,盆栽型品种则应侧重分蘖能力与株型调控研究。通过Saaty一致性检验(CI<0.1)证实,各判断矩阵的逻辑自洽性满足AHP建模要求。

3.6 种源综合评价结果

依据表3中的评分标准,为6个种源分别赋予对应的分值,再参照表10中的各因子权重值,最终计

表8 A1鲜食型判断矩阵与一致性检验

Table 8 A1 fresh food type judgment matrix and consistency test

层级	指标	C1	C2	C3	权重(W)	层级	指标	P1	P2	P3	权重(W)
A1-C	C1	1	1/7	1/5	0.075 1	C1-P	P1	1	5	5	0.714 2
	C2	7	1	2	0.591 7		P2	1/5	1	1	0.142 9
	C3	5	1/2	1	0.333 2		P3	1/5	1	1	0.142 9
检验	λ_{max}=3.014 2,CI=0.007 1,RI=0.514 9, CR=0.013 8<0.1					检验	λ_{max}=3.000 0,CI=0,RI=0.514 9,CR=0<0.1				
C2-P		P4	P5	P6	权重(W)	C3-P		P7	P8		权重(W)
		1	5	3	0.637 0			1	5		0.833 3
		1/5	1	1/3	0.104 7			1/5	1		0.166 7
		1/3	3	1	0.258 3						
检验	λ_{max}=3.038 5,CI=0.019 3,RI=0.514 9, CR=0.037 5<0.1					检验	λ_{max}=2.000 0,CI=0,RI=0,CR=0<0.1				

表9 A2盆栽型判断矩阵与一致性检验

Table 9 A2 potted plant type judgment matrix and consistency test

层级	指标	C1	C2	C3	权重(W)	层级	指标	P1	P2	P3	权重(W)
A2-C	C1	1	5	1	0.454 6	C1-P	P1	1	3	3	0.600 0
	C2	1/5	1	1/5	0.090 9		P2	1/3	1	1	0.200 0
	C3	1	5	1	0.454 6		P3	1/3	1	1	0.200 0
检验	λ_{max}=3.000 0,CI=0,RI=0.514 9,CR=0<0.1					检验	λ_{max}=3.000 0,CI=0,RI=0.514 9,CR=0<0.1				
C2-P		P4	P5	P6	权重(W)	C3-P		P7	P8		权重(W)
		1	3	3	0.600 0			1	1/3		0.250 0
		1/3	1	1	0.200 0			3	1		0.750 0
		1/3	1	1	0.200 0						
检验	λ_{max}=3.000 0,CI=0,RI=0.514 9,CR=0<0.1					检验	λ_{max}=2.000 0,CI=0,RI=0,CR=0<0.1				

表10 指标层P对于目标层A的总排序值

Table 10 The total sorting value of the standard layer P for the target layer A

约束层	指标层	A1权重值	排名	A2权重值	排名
C1	P1	0.053 6	6	0.272 8	2
	P2	0.010 7	7	0.090 9	4
	P3	0.010 7	7	0.090 9	4
C2	P4	0.376 9	1	0.054 5	6
	P5	0.376 9	4	0.018 2	7
	P6	0.152 8	3	0.018 2	7
C3	P7	0.277 7	2	0.113 7	3
	P8	0.055 5	5	0.340 9	1
检验		CI=0.011 4,RI=0.343 3,CR(0.033 2)<0.1		CI=0,RI=0.280 9,CR(0)<0.1	

算得出综合评价值。由数据可得,种源R1在鲜食型评分中表现最优(8.860 2分),而种源R6则在盆栽型评分中达到最高值(9.673 8分),见表11。总体来看,这些种质均契合铁皮石斛产品在品质与生长特性方面的应用要求。

表11 不同种源铁皮石斛综合评价值

Table 11 Comprehensive evaluation value of *Dendrobium officinale from* different provenances

编号	鲜食型/分	盆栽型/分
R1	8.860 2	8.655 4
R2	8.428 8	8.073 6
R3	5.465 4	5.955 0
R4	5.597 8	6.427 8
R5	4.999 6	5.709 6
R6	7.937 8	9.673 8

4 讨 论

本研究通过构建铁皮石斛产业化品种筛选体系,在评价维度和应用场景的针对性上取得了重要进展。与传统以形态特征和单一药用成分为核心的评价体系相比[15],本研究创新性地将抗寒性、萌发新芽数等生态适应性指标纳入评价体系,并结合鲜食与盆栽用途的差异化需求赋予权重,突破了以往重品质、轻适应性的局限。已有研究虽运用层次分析法评价药用石斛种质资源,但未明确区分不同产业目标下的性状优先级[16],本研究发现,鲜食型品种的核心权重因子为多糖含量,盆栽型品种则以萌发新芽数为主导,这一结果为定向育种提供了精准靶点,弥补了前人研究中通用化评价的不足。在抗寒性评价中,安徽大别山种源(R6)的冻害指数显著优于低纬度种源,高纬度种源可能因长期低温驯化而增强抗寒性这与文献[17]研究结果一致。这些发现为铁皮石斛产业化发展提供了新的视角[18]。随着市场需求从单一药用向鲜食、盆栽等多元化场景扩展,传统选育策略难以满足实际需求。通过建立兼顾品质与适应性的综合评价体系,本研究不仅为北方温室栽培提供了优质种源筛选依据,还揭示了多目标育种中性状权重的动态调整规律。这一体系的推广有望提升产业抗风险能力,推动铁皮石斛从传统药材向高附加值产品的转型。

值得注意的是,尽管本研究初步验证了评价体系的可行性,但种源样本量较小(仅6个)可能限制了遗传多样性的全面覆盖。同时,抗寒性评价基于北方温室环境,未模拟极端低温或湿度波动的长期效应,可能低估种源的真实适应潜力。此外,层次分析法中盆栽观赏性等定性指标依赖主观判断,可能引入评估偏差。未来需扩大种源收集范围,整合代谢组学与表观遗传学数据,解析抗寒性、多糖合成等关键性状的分子基础。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Part Ⅰ)[M]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020.

[2] Xia L J, Liu X F, Guo H Y, et al. Partial characterization and immunomodulatory activity of polysaccharides from the stem of *Dendrobium officinale* (Tiepishihu) *in vitro* [J]. Journal of Functional Foods, 2012, 4(1): 294-301.

[3] Liu Y G, Yang L L, Zhang Y, et al. *Dendrobium officinale* polysaccharide ameliorates diabetic hepatic glucose metabolism *via* glucagon-mediated signaling pathways and modifying liver-glycogen structure [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 248: 112308.

[4] Wong T L, Li L F, Zhang J X, et al. Oligosaccharide-marker approach for qualitative and quantitative analysis of specific polysaccharide in herb formula by ultra-high-performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight mass spectrometry: *Dendrobium officinale*, a case study [J]. Journal of Chromatography A, 2019, 1607: 460388.

[5] 朱虹, 郗厚诚, 孙长生. 我国铁皮石斛产业现状和发展对策[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(12): 77-79.
Zhu H, Xi H C, Sun C S. The current situation and de-

velopment countermeasures of *Dendrobium officinale* industry in China [J]. Shaanxi Agricultural Science, 2014, 60(12): 77-79.

[6] 李光, 路娟, 陈曦. 铁皮石斛产业发展存在的问题与对策[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(4): 469-471.
Li G, Lu J, Chen X. Some worries about *Dendrobium officinale* industry [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(4): 469-471.

[7] Albayrak E, Erensal Y C. Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: an application of multiple criteria decision making problem [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(4): 491-503.

[8] 孙亚林, 黄新芳, 何燕红, 等. 运用层次分析法评价多子芋种质资源[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(1): 16-22.
Sun Y L, Huang X F, He Y H, et al. Evaluating germplasm of taro with numerous cormels via analytic hierarchy process[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(1): 16-22.

[9] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude fiber in vegetable foods: GB/T 5009.10—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.

[10] 褚云霞, 任丽, 邓姗, 等. 基于层次分析法的红掌种质资源评价[J]. 上海农业学报, 2023, 39(1): 40-47.
Chu Y X, Ren L, Deng S, et al. Evaluation of anthur-ium germplasm resources based on analytic hierarchy process [J]. Shanghai Journal of Agriculture, 2023, 39(1): 40-47.

[11] 何铁光, 杨丽涛, 李杨瑞, 等. 铁皮石斛原球茎多糖DCPP1a-1的理化性质及抗肿瘤活性[J]. 天然产物研究与开发, 2007, 19(4): 578-583.
He T G, Yang L T, Li Y R, et al. Physicochemical properties and antitumor activity of polysaccharide DCPP1a-1 from suspension-cultured protocorms of *Dendrobium officinale* [J]. Natural Product Research and Development, 2007, 19(4): 578-583.

[12] 李利娜. 铁皮石斛多糖改善*D*-半乳糖诱导小鼠衰老作用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
Li L N. Effect of *Dendrobium officinale* polysaccharide on improving aging induced by *D*-galactose in mice [D]. Suzhou: Soochow University, 2012.

[13] 苑鹤, 白燕冰, 斯金平, 等. 柱前衍生HPLC分析铁皮石斛多糖中单糖组成的变异规律[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(18): 2465-2470.
Yuan H, Bai Y B, Si J P, et al. Variation of monosaccharide composition of polysacchrides in *Dendrobium officinale* by pre-column derivatization HPLC method [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2011, 36(18): 2465-2470.

[14] Xiao L, Ng T B, Feng Y B, et al. *Dendrobium candidum* extract increases the expression of aquaporin-5 in labial glands from patients with Sjögren's syndrome [J]. Phytomedicine, 2011, 18(2/3): 194-198.

[15] 包英华. 铁皮石斛种质资源的鉴定与评价研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2014.
Bao Y H. Identification and evaluation of *Dendrobium officinale* germplasm resources [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 2014.

[16] 陈慧玲, 刘宗坤, 杨彦伶, 等. 基于层次分析法的药用石斛种质资源评价[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(1): 82-87.
Chen H L, Liu Z K, Yang Y L, et al. Evaluating germplasm of medicinal *Dendrobium* spp. via analytic hierarchy process [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, 37(1): 82-87.

[17] 史骥清, 吴雅, 王怀青, 等. 不同地域铁皮石斛抗寒性研究[J]. 现代农业科技, 2009(20): 118-119.
Shi J Q, Wu Y, Wang H Q, et al. The comparetive study on cold tolerance of *Dendrobium officinale* from different geographical regions [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009(20): 118-119.

[18] 周玉飞,张显波,李廷洋,等. 黔西南喀斯特地区石斛生物学特征调查及资源评价[J]. 生物资源,2024,46(05):445-454.
Zhou Y F,Zhang X B,Li T Y,et al. Biological characteristic investigation and resource evaluation of Dendrobium in Karst areas ofsouthwest Guizhou [J]. Biotic Resources, 2024, 46(5): 445-454.