郁书怀, 林甜甜, 戚勇, 等. 不同产地及种植模式铁皮石斛的品质综合分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 329−339. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050125

YU Shuhuai, LIN Tiantian, QI Yong, et al. Comprehensive Analysis of the Quality of *Dendrobium officinale* from Different Origins and Cultivation Modes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 329−339. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050125

· 分析检测 ·

不同产地及种植模式铁皮石斛的品质综合分析

郁书怀[1], 林甜甜[1], 戚　勇[2], 姚国祥[2], 庞敏霞[2,*], 余达威[1,*]

（1.江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122;
2.浙江健九鹤集团有限公司, 浙江 宁波 315000）

摘　要: 本研究旨在探究不同产地及种植模式铁皮石斛的品质差异。研究选取了云南德宏、广西灵山、贵州三穗、安徽霍山、浙江乐清和浙江余姚 6 个产地的 8 种铁皮石斛样本，系统比较了其基础成分、活性物质含量及抗氧化活性等方面的差异。结果显示，铁皮石斛的品质受产地及种植模式的影响显著。8 种铁皮石斛的脂肪含量为 0.15%~1.23%，蛋白质含量为 2.79%~4.29%，灰分含量为 2.31%~6.23%。大棚种植的铁皮石斛总多糖含量（27.63%~41.06%）高于仿野生种植（26.80%~26.96%）。而仿野生种植的铁皮石斛在总黄酮（0.468%~0.513%）、总酚含量（0.347%~0.356%）以及 DPPH 自由基清除力（3.175~4.667 mg Trolox/g）方面表现更优。8 种样本均含有原儿茶酸、香草酸、阿魏酸和苯甲酸，其中苯甲酸为主要酚酸组分。贵州三穗（SH3）样本的苯甲酸相对含量最高，达 14.908，是浙江余姚（SH7）的 5.95 倍。总氨基酸含量介于 2413~3596 mg/100 g，必需氨基酸/总氨基酸比率为 35.82%~37.45%。主成分分析进一步证实，产地及种植模式对铁皮石斛的营养成分有显著影响，进而影响其品质和药理作用。综上，浙产铁皮石斛，尤其是仿野生种植下的铁皮石斛总酚和总黄酮含量更高、抗氧化能力更强，大棚种植模式则更利于铁皮石斛多糖的积累。

关键词: 铁皮石斛, 产地差异, 种植方法, 品质特性评价, 活性成分, 主成分分析

中图分类号: TS202.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0329−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050125

本文网刊:

Comprehensive Analysis of the Quality of *Dendrobium officinale* from Different Origins and Cultivation Modes

YU Shuhuai[1], LIN Tiantian[1], QI Yong[2], YAO Guoxiang[2], PANG Minxia[2,*], YU Dawei[1,*]

（1.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2.Zhejiang Jianjiuhe Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China）

Abstract: This study aimed to explore the quality differences of *Dendrobium officinale* from various origins and cultivation methods. A total of eight samples of *Dendrobium officinale* were collected from six locations: Dehong in Yunnan, Lingshan in Guangxi, Sansui in Guizhou, Huoshan in Anhui, Yueqing in Zhejiang, and Yuyao in Zhejiang. The study systematically compared the differences in basic components, active substance content, and antioxidant activity. The results indicated that the quality of *Dendrobium officinale* was significantly influenced by its origin and cultivation modes. The fat content of the eight samples ranged from 0.15% to 1.23%, protein content from 2.79% to 4.29%, and ash content from 2.31% to 6.23%. The total polysaccharide content of *Dendrobium officinale* grown in greenhouses (27.63% to 41.06%) was higher than that of those cultivated in simulated wild (26.80% to 26.96%). However, the simulated wild cultivated *Dendro-*

收稿日期: 2025−05−14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金（31901630）; 余姚市科技创新项目暨“揭榜挂帅”农业与社会发展类项目（2024JH03010042）。

作者简介: 郁书怀（1988−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品加工, E-mail: shuhuai@jiangnan.edu.cn。

*** 通信作者:** 庞敏霞（1989−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 中药药理与新产品开发研究、农业资源与环境, E-mail: pmx059@163.com。

余达威（1990−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: yudw@jiangnan.edu.cn。

bium officinale exhibited superior performance in total flavonoids (0.468% to 0.513%), total phenolic content (0.347% to 0.356%), and DPPH radical scavenging ability (3.175 to 4.667 mg Trolox/g). All eight samples contained protocatechuic acid, vanillic acid, ferulic acid, and benzoic acid, with benzoic acid being the main phenolic acid component. The relative content of benzoic acid in the Guizhou Sansui (SH3) sample was the highest, reaching 14.908, which was 5.95 times that of the Zhejiang Yuyao (SH7). The total amino acid content ranged from 2413~3596 mg/100 g, and the ratio of essential amino acids to total amino acids was between 35.82% and 37.45%. Principal component analysis further confirmed that the origin and cultivation modes significantly affect the nutritional components of *Dendrobium officinale*, thereby influencing its quality and pharmacological effects. In conclusion, *Dendrobium officinale* produced in Zhejiang, particularly under wild-simulated cultivation, exhibits higher levels of total phenolics and total flavonoids along with stronger antioxidant activity, while the greenhouse cultivation mode was more conducive to the accumulation of polysaccharides.

Key words: *Dendrobium officinale*; origin differences; cultivation modes; quality characteristic evaluation; active ingredients; principal component analysis

铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura & Migo)作为兰科石斛属的多年生草本类药用植物,以其茎部入药而闻名,是珍贵的传统中药材。2023 年 11 月 9 日,国家卫生健康委员会和国家市场监督管理总局联合发布公告,将铁皮石斛纳入“药食同源”物质目录,推动了其产品形式的多样化发展,包括干制品、中成药、保健品、添加石斛原料的新食品以及添加石斛提取物的日化产品等[1]。市场需求的增长也促进了铁皮石斛种植范围的持续扩大。

铁皮石斛中富含多种对健康有益的功能因子,包括多糖类、黄酮类、酚类以及生物碱等。这些成分具有广泛的生理与药理作用,如抗氧化、抗炎、免疫调节、抗衰老、治疗骨质疏松、降血糖和保肝等,构成了其药用价值和保健功效的核心[2−5]。其中,多糖是铁皮石斛中最核心的活性成分,能够通过改变线粒体功能、调节 ROS 生成、调控细胞死亡相关蛋白的表达,以及激活 NF-κB 和 PI3K/AKT 信号通路,从而诱导肿瘤细胞凋亡。此外,多糖还能通过调节免疫细胞分化和促进细胞因子分泌等途径来增强免疫功能[6−8]。黄酮与酚类成分是铁皮石斛抗氧化活性的主要贡献者。Ren 等[9] 研究发现,C-糖基转移酶(DcaCGT)具有双重催化功能,可特异性介导 C-糖基化和 O-糖基化反应,这为铁皮石斛黄酮苷的结构多样性提供了分子基础。酚类物质则常与多糖形成复合物,通过协同作用显著增强抗氧化效能,如有效抑制脂质过氧化链式反应[10−13]。环境因子对铁皮石斛活性成分的组成与含量具有关键调控作用。研究发现,非生物胁迫(如 UV-B 辐射、温度、干旱)能显著激活次生代谢通路[14]。如,UV-B 辐射通过上调查尔酮合成酶(CHS)活性促进黄酮积累;适度干旱胁迫则激活多糖合成关键基因表达[15]。当前,铁皮石斛在我国的主要产地分布广泛,涉及安徽西南部、浙江东部、福建西部、广西西北部、四川、云南东南部以及江西等地,主要种植模式包括大棚栽培、林下活树附生和仿野生种植。然而,针对不同产地及种植模式铁皮石斛的系统性对比研究相对匮乏,且现有研究存在局限。例如,张静芳等[16] 发现除含水率外,不同产区铁皮石斛的表型性状、多糖含量及醇溶性浸出物离散显著,尤以多糖含量差异最为突出。仝晶晶等[17] 对比 6 个产地的铁皮石斛功效成分,发现浙江乐清双峰乡产区铁皮石斛综合表现最优。丁玉莲等[18] 证实产地因素显著影响黄酮积累,仿野生模式下环境差异对黄酮成分的调控效应尤为显著,这可能与区域气候异质性直接相关。He 等[19] 的研究通过比较铁皮石斛三种种植模式下的代谢组学,发现林下活树附生种植的铁皮石斛在总酚与类黄酮含量、抗氧化能力和 α-葡萄糖苷酶抑制活性方面表现更优。这表明,产地及栽培环境能够显著影响铁皮石斛生长代谢过程中生物活性物质的合成与积累,进而显著影响铁皮石斛的品质。因此,系统开展不同产地及种植模式铁皮石斛对比研究至关重要。这不仅有助于深入剖析不同来源铁皮石斛的特性,还能为后续的品质评价、产地选育及产品开发提供关键依据,从而推动铁皮石斛产业的高质量发展。

本文选取了云南德宏、广西灵山、贵州三穗、安徽霍山、浙江乐清和浙江余姚 6 个不同产地来源的 8 种铁皮石斛样品,通过对比其基础成分、多糖、总黄酮、总酚、单糖组成、柚皮素、酚酸组成、抗氧化活性、生物碱和氨基酸含量等指标的差异,并结合主成分分析(PCA)深入探究不同产地及种植模式铁皮石斛的品质差异,旨在为铁皮石斛的品质精准评估和开发利用构建完备的理论框架和可靠的科学指引。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

铁皮石斛茎干条　均为清明前后采摘,无病虫害,经鉴定为铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura et Migo)的干燥茎,产地及种植方式如表 1 所示;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除力试剂盒　南京建成生物工程研究所;木瓜蛋白酶(食品级,10^5 U/g)　南宁庞博生物工程有限公司;柚皮素(色谱级)、芦丁(分析级)、没食子酸(分析级)、三氟乙酸(分析级)　上海麦克林生化科技股份有限公司;石斛碱(色谱级)　北京索莱宝科技有限公司;氢氧化钠、盐酸、硫酸、甲醇、无水乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、福林酚、碳酸钠　均为分析级,国药集团化学试剂有限公司。

表 1　铁皮石斛样品信息

Table 1　*Dendrobium officinale* sample information

编号	产地	生长年限	种植方式
SH1	云南德宏	4~5年生	大棚
SH2	广西灵山	4~5年生	大棚
SH3	贵州三穗	4~5年生	大棚
SH4	安徽霍山	4~5年生	大棚
SH5	浙江乐清	4~5年生	大棚
SH6	浙江乐清	4~5年生	仿野生
SH7	浙江余姚	4~5年生	大棚
SH8	浙江余姚	4~5年生	仿野生

BPG-9070A 型精密鼓风干燥箱、MP-501A 型超级恒温循环槽、SX2-10-12N 型马弗炉　上海一恒科学仪器有限公司；FST-800T 型多功能粉碎机　东莞市房太电器有限公司；FreeZone 冷冻干燥机　美国 Labconco 公司；SZC-101 型自动脂肪测定仪、KDN-19H2 型自动定氮仪　上海纤检仪器有限公司；Epoch 型酶标仪　南京拜尔沃克智能科技有限公司；KQ5200DE 型数控超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司；Agilent 1260 型高效液相色谱　美国安捷伦科技公司；ICS-5000 型高压离子色谱系统　美国赛默飞世尔科技公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品前处理　将铁皮石斛干条置于 60 ℃ 鼓风干燥至恒重后，采用多功能粉碎机粉碎并过 60 目筛，将过筛后的粉末样品置于干燥皿中备用。

1.2.2　基本成分测定　脂肪的测定参考 GB/T 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法；蛋白质的测定参考 GB/T 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法；灰分的测定参考 GB/T 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》。

1.2.3　总多糖含量测定　采用酶法对铁皮石斛中的多糖进行提取。称取铁皮石斛粉末 2.0 g，加入去离子水 80 mL 和 0.02 g 食品级木瓜蛋白酶，置于酶反应器中，60 ℃ 反应 2 h，静置冷却，5000 r/min 离心 10 min，上清液转移至容量瓶，加入去离子水定容。取适量混匀后的样品溶液，加入 4 倍体积无水乙醇 4 ℃ 醇沉 6 h，4000 r/min 离心 20 min，沉淀用 80% 乙醇洗涤两次后加水溶解，获得供试品溶液。采用苯酚-硫酸法[20] 测定总糖含量，以葡萄糖为对照品。

1.2.4　单糖组成测定　取醇沉后的样品，冻干获得多糖粉末。精密称取 10 mg 样品溶于 5 mL、4 mol/L 三氟乙酸溶液中，置于 121 ℃ 下酸解 2 h，吹干酸液，加入 5 mL 去离子水溶解，获得供试品溶液。采用离子色谱对铁皮石斛中的单糖组成进行测定。采用外标法，配制 10 种单糖的混标溶液，通过比对保留时间定性，峰面积定量。

色谱柱使用 CarboPac PA20，柱温为 30 ℃，流动相为水（A）-1 mol/L 醋酸钠（B）-250 mmol/L 氢氧化钠（D），检测波长为 280 nm，流速为 0.5 mL/min，进样量为 10 μL，流动相梯度洗脱程序如下：0~13 min，98%A，2%D；13~13.1 min，98%~93%A，2%D；13.1~20 min，93%~78%A，2%D；20~21 min，78%~20%A，2%~80%D；21~30 min，20%A，80%D。

1.2.5　总黄酮含量测定　总黄酮是样品中所有黄酮类化合物的总量。参考唐丽等[21] 的方法提取总黄酮，稍作修改。称取铁皮石斛粉末 0.4 g，加入 8 mL、70% 乙醇，70 ℃ 超声提取 40 min，5000 r/min 离心 10 min，上清液转移至 25 mL 容量瓶，加入 70% 乙醇定容，充分摇匀，冷却，获得供试品溶液。

采用亚硝酸钠-硝酸铝法[22] 测定总黄酮含量，稍作修改。量取供试品溶液 1 mL 于试管中，加入 1 mL 70% 乙醇溶液，振荡均匀后加入 5% $NaNO_2$ 溶液 375 μL，振荡均匀，避光静置 5 min，加入 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 250 μL，振荡均匀，避光静置 5 min，最后加入 1 mo1/L NaOH 溶液 2.0 mL 振荡混匀后，避光静置 15 min，在 510 nm 的波长处测定吸光度，以芦丁为对照品。

1.2.6　柚皮素含量测定　参考陈晓霞[23] 的方法提取测定柚皮素，稍作修改。称取铁皮石斛粉末 1.0 g 加入甲醇-10% 盐酸（5∶1）溶液，加热回流 3 h，冷却后过滤，减压浓缩，用甲醇溶液溶解并定容至 25 mL 即为供试品溶液。采用外标法，配制柚皮素标准系列溶液，以浓度为横坐标，峰面积为纵坐标制作标准曲线，根据保留时间定性，峰面积定量。

色谱测定条件：色谱柱使用 XBridge C_{18} 液相色谱柱，柱温为 30 ℃，流动相为 0.2% 磷酸（A）-甲醇（B），检测波长为 288 nm，流速为 1.0 mL/min，进样量为 10 μL，流动相梯度洗脱程序如下：0~5 min，25%B；5~10 min，25%~30%B；10~25 min，30%~40%B；25~45 min，40%~55%B；45~50 min，55%~60%B。

1.2.7　总酚含量测定　总酚是样品中所有酚类化合物的总量，是酚酸和其他酚类物质的总和。参考尚艳等[24] 的方法提取总酚，稍作修改。精密称取铁皮石斛粉末 0.5 g，加入 10 mL 70% 甲醇，70 ℃ 超声提取 40 min，5000 r/min 离心 10 min，上清液转移至 10 mL 容量瓶，加入 70% 甲醇定容，充分摇匀，冷却，获得供试品溶液。

取供试品溶液稀释至合适浓度，量取 1 mL 于试管中，加入 2 mL 10%（v/v）福林酚试剂，振荡均匀，避光静置 5 min，依次加入 7.5% Na_2CO_3 溶液 2 mL、去离子水 5.0 mL，振荡均匀，40 ℃ 水浴 20 min，冷却至室温，在波长 765 nm 处测定吸光度，以没食子酸为对照品。

1.2.8　酚酸组成测定　酚酸是总酚中的一个具体类别，其提取和检测方法如下：称取铁皮石斛粉末 0.5 g 置于离心管中，加入 10 mL 80% 甲醇，于 70 ℃ 下

360 W超声 45 min, 5000 r/min 离心 10 min, 上清液转移至 10 mL 容量瓶, 加入 80% 甲醇定容, 充分摇匀, 冷却, 获得供试品溶液。采用外标法, 配制 8 种酚酸的混标溶液, 通过比对保留时间定性, 峰面积定量。

色谱测定条件: 色谱柱使用 XBridge C_{18} (4.6 mm×250 mm, 5 μm), 柱温为 30 ℃, 流动相为 0.05% 磷酸(A)-甲醇(B), 检测波长为 280 nm, 流速为 0.6 mL/min, 进样量为 10 μL, 流动相梯度洗脱程序如下: 0~5 min, 10%~20%B; 5~55 min, 20%~40%B; 55~60 min, 40%~80%B; 60~65 min, 80%B; 65~70 min, 80%~10%B; 70~77 min, 0%B。

1.2.9 DPPH 自由基清除力测定 DPPH 自由基清除力根据检测试剂盒中说明书进行。称取 0.1 g 铁皮石斛粉末, 加入 1 mL 80% 甲醇溶液, 冰水浴匀浆 10 min, 12000 r/min 离心10 min, 上清液即为供试品溶液。以 80% 甲醇为溶剂配制 0.5 mg/mL Trolox 标准溶液并稀释, 分别量取浓度为 0、5、10、15、20、25 μg/mL 标准液 400 μL, 加入 600 μL DPPH 乙醇溶液混匀, 避光静置 30 min, 4000 r/min 离心 5 min, 上清液于 517 nm 测定吸光度, 按公式(1)计算 DPPH 自由基清除率, 以 Trolox浓度为横坐标, DPPH 自由基清除率为纵坐标绘制标准曲线。DPPH 自由基清除力标准曲线方程为 $y=0.026x-7\times10^{-5}$, $R^2=0.9954$。取供试品溶液稀释至合适浓度, 操作同上, 记为样品管。空白管用 80% 乙醇代替样品, 对照管用 80% 乙醇代替 DPPH 乙醇溶液。DPPH 自由基清除力以标准品 Trolox 当量计(mg Trolox/g)。

$$\text{标曲DPPH自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_S}{A_{S0}}\right)\times100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{样本DPPH自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times100 \quad \text{式(2)}$$

式中: A_S 为各浓度标准管的吸光度; A_{S0} 为标准浓度为 0 的一管; A_0 表示空白管的吸光度; A_1 表示样品管的吸光度; A_2 表示对照管的吸光度。

1.2.10 生物碱含量测定 参考周文雅[25]的方法提取测定生物碱, 稍作修改。称取铁皮石斛粉末 0.5 g, 加入 10% 氨水和氯仿并称重, 65 ℃ 水浴加热冷凝回流 2 h, 冷却后过滤, 用氯仿稀释滤液, 加入缓冲液及溴甲酚绿溶液, 剧烈振荡, 静置至明显分层, 取下层溶液加入 NaOH 无水乙醇溶液, 在波长为 620 nm 处测定吸光度, 以石斛碱为对照品。

1.2.11 氨基酸组成及含量测定 参考杨玉亮等[26]的方法, 采用酸水解法进行制样。称取样品 300.0 mg 置于水解管中, 加入 6 mol/L HCl, 充氮气 3 min, 溶液置于 120 ℃ 烘箱中水解 22 h。水解结束后, 加 NaOH 中和, 用蒸馏水定容至 25 mL。过滤并离心, 上清液即为供试品溶液。采用外标法, 配制 17 种氨基酸的混标溶液, 通过比对保留时间定性, 峰面积定量。

色谱条件参考冯琳[27]的方法: 色谱柱使用 Agilent Hypersil ODS 柱, 柱温为 40 ℃, 流动相为醋酸钠-三乙胺-四氢呋喃(A)-醋酸钠-甲醇-乙醇(B), 检测波长为 338 nm, 流速为 1.0 mL/min, 进样量为 10 μL, 流动相梯度洗脱程序如下: 0~17 min, 8%~50% B; 17~20.1 min, 50%~100% B; 20.1~24 min, 100%~0% B。

1.3 数据处理

每组试验重复 3 次, 采用 Excel 2019 对数据进行汇总和整理, 采用 IBM SPSS Statistics 27 对数据进行显著性分析, 采用 Origin 2021 进行作图, 采用 Simca 14.1 对数据进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同产地及种植模式铁皮石斛基本成分分析

植物的生长常受多重环境因子(如地理位置、气候、土壤类型和灌溉水平等)的共同调控, 这些因素均会影响植物营养成分、代谢物和生物活性物质的合成与积累[28−29]。产地和种植模式的差异对铁皮石斛的基础成分具有显著影响(表 2)。其中, 脂肪含量较高的为 SH6(1.23%), 显著高于其他 7 种, SH8(0.15%)显著低于其他 7 种($P<0.05$)。SH2(2.79%)和 SH7(2.80%)的蛋白质含量显著低于其它 6 种, 而 SH1(4.29%)的蛋白质含量显著高于其他 7 种($P<0.05$)。SH1(2.31%)的灰分含量显著低于其他 7 种, SH8(6.23%)的灰分含量显著高于其他 7 种($P<0.05$)。

表 2 不同产地及种植模式铁皮石斛基本成分

Table 2 Basic components of *Dendrobium officinale* in different regions and cultivation patterns

样品	脂肪含量(g/100 g)	蛋白质含量(g/100 g)	灰分含量(g/100 g)
SH1	0.70±0.01^{d}	4.29±0.02^{a}	2.31±0.01^{h}
SH2	0.68±0.02^{e}	2.79±0.01^{g}	2.99±0.03^{e}
SH3	0.86±0.01^{b}	3.21±0.01^{f}	2.72±0.02^{f}
SH4	0.77±0.01^{c}	3.42±0.01^{d}	2.56±0.01^{g}
SH5	0.71±0.02^{d}	3.70±0.01^{c}	3.02±0.02^{d}
SH6	1.23±0.03^{a}	3.31±0.01^{e}	3.25±0.01^{c}
SH7	0.70±0.02^{d}	2.80±0.01^{g}	3.56±0.01^{b}
SH8	0.15±0.01^{f}	4.20±0.01^{b}	6.23±0.01^{a}

注: 同列数据后不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 不同产地及种植模式铁皮石斛总多糖及单糖组成分析

多糖是铁皮石斛最主要的活性成分之一, 具有增强免疫力[30]、抗氧化[31]、抗疲劳[20]、降血糖[32−33]等多种生理功效, 其含量的高低直接影响铁皮石斛的药用价值。如图 1 所示, 不同产地及种植模式铁皮石斛的总多糖含量均高于 25%, 符合《中华人民共和国药典: 2020 版》对铁皮石斛干燥品中多糖含量的规定。其中 SH5(41.06%)和 SH7(38.74%)的多糖含量

显著高于其他样本（P<0.05）。SH3（33.53%）和 SH4（33.22%）间多糖含量差异不显著（P>0.05），但与其他的样本之间差异显著。其中仿野生种植生产的铁皮石斛 SH6（26.80%）和 SH8（26.96%）多糖含量显著低于大棚种植样本（27.63%~41.06%）（P<0.05）。温暖湿润且土壤含水量适宜的环境利于铁皮石斛的生长及其多糖的积累。大棚种植能够有效控制温湿度，适合的昼夜温差亦能促进多糖的积累[34]。这可能是造成大棚种植样本（尤其浙产铁皮石斛）多糖含量整体高于仿野生种植及其他地区样本的原因。

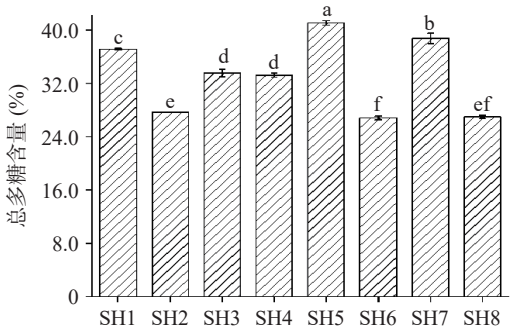


图 1　不同产地及种植模式铁皮石斛总多糖含量

Fig.1　Total polysaccharide contents of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

注：图中不同字母表示有显著性差异（P<0.05），图 3~图 5、图 7~图 8 同。

单糖是指不能再被简单水解成更小的糖类的分子。如图 2 和表 3 所示（以岩藻糖为参照峰）。甘露糖和葡萄糖是铁皮石斛主要单糖组分，但二者的比例存在差异，结果与既有研究一致[35−36]。研究表明，低甘露糖/葡萄糖比的铁皮石斛多糖可下调与血清支链氨基酸（BCAA）生物合成相关的微生物基因丰度，改善宿主 BCAA 代谢，从而发挥显著的抗糖尿病功效[37]。此外，多糖中还存在少量的岩藻糖、半乳糖和阿拉伯糖，SH8 还额外检出微量的鼠李糖。铁皮石斛基因组中存在编码 UDP-鼠李糖合酶的基因，但其表达受发育阶段、非生物胁迫及组织部位调控，在茎中含量极低。佟岩等[38] 研究发现，24 h 低温胁迫可

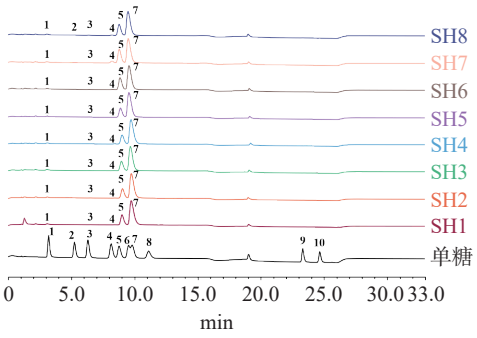


图 2　铁皮石斛单糖组成色谱分析

Fig.2　Analysis of monosaccharide composition in *Dendrobium officinale* by chromatography

注：1：岩藻糖；2：鼠李糖；3：阿拉伯糖；4：半乳糖；5：葡萄糖；6：木糖；7：甘露糖；8：果糖；9：半乳糖醛酸；10：葡萄糖醛酸。

表 3　单糖组成相对含量分析

Table 3　Relative content analysis of monosaccharides composition

样品	单糖组成及浓度比					
	岩藻糖	阿拉伯糖	半乳糖	葡萄糖	甘露糖	鼠李糖
SH1	1	0.061	0.116	19.628	50.981	−
SH2	1	0.076	0.184	23.017	62.051	−
SH3	1	0.057	0.104	17.019	43.322	−
SH4	1	0.079	0.149	18.366	52.324	−
SH5	1	0.070	0.138	23.978	67.145	−
SH6	1	0.157	0.455	29.841	59.570	−
SH7	1	0.117	3.219	30.577	53.646	−
SH8	1	0.267	0.657	21.264	46.540	0.094

注：以岩藻糖为参照峰。

诱导铁皮石斛 UDP-鼠李糖合酶表达上调。这可能是 SH8 鼠李糖含量相对较高的原因[39−40]。

2.3　不同产地及种植模式铁皮石斛总黄酮及柚皮素含量分析

黄酮是一种具备抗氧化功效的次生代谢产物，也是铁皮石斛主要的活性成分之一[41]。如图 3 所示，不同产地及种植模式的铁皮石斛中总黄酮含量有差异。SH6 中的总黄酮含量显著高于其他样品（P<0.05），达到了 0.513%，SH8 次之，为 0.468%，含量最低的为 SH1，仅为 0.102%，与 SH2（0.107%）无显著性差异（P<0.05）。孙凤婷等[42] 对比了 10 批次不同产地的铁皮石斛的总黄酮含量，分布在 0.152%~0.436%。本研究测得的 8 个样本总黄酮含量分布在 0.102%~0.513% 范围内，与其的研究结果相近。其中仿野生种植生产的铁皮石斛 SH6（0.513%）和 SH8（0.468%）总黄酮含量显著高于大棚种植样本（0.102%~0.276%）（P<0.05）。徐丽红等[43] 的研究表明，越接近野生的栽培模式，越利于黄酮和酚类物质的积累。这主要归因于非生物胁迫条件（如大昼夜温差、强紫外辐射、低水分及低养分等）能激活苯丙烷代谢途径，促使植物合成更多酚和黄酮等具有抗氧化功能的次生代谢产物以应对环境压力。

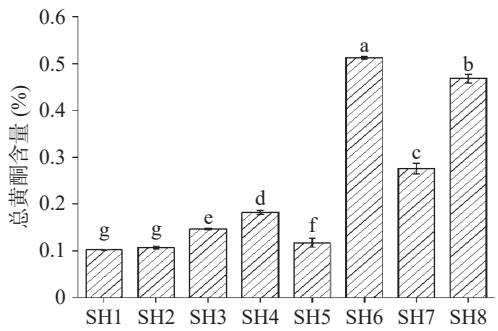


图 3　不同产地及种植模式铁皮石斛的总黄酮含量

Fig.3　Total flavonoid content of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

柚皮素属于二氢黄酮类化合物，是铁皮石斛中的一种标志性成分，具有重要的药理作用，可用于鉴别铁皮石斛的真伪和质量控制。如图 4 所示，不同

产地及种植模式铁皮石斛的柚皮素含量有差异，SH6（89.42 μg/g）中的柚皮素含量显著高于其他样品（$P<0.05$）；其次为 SH8（69.21 μg/g），SH1（44.38 μg/g）最低，该趋势与总黄酮含量分布一致。吕朝耕等[44] 对两个不同种源的浙产石斛（设置两个栽培周期，共 24 批样品）的研究显示，柚皮素的最高含量为 15.92 μg/g。本研究中 8 个铁皮石斛样品柚皮素含量较高，整体品质较优。柚皮素的含量在不同产地及种植模式的铁皮石斛中存在差异，这为建立更精准的铁皮石斛质量评价提供了依据。

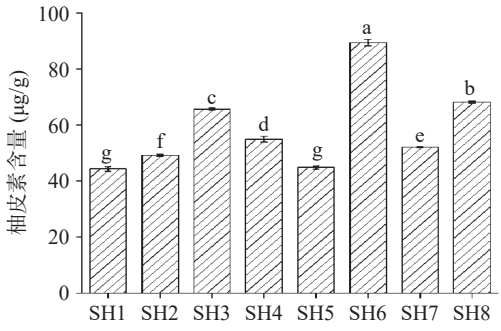


图 4 不同产地及种植模式铁皮石斛的柚皮素含量

Fig.4 Naringin content of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

2.4 不同产地及种植模式铁皮石斛总酚及酚酸分析

总酚是指样品中酚类化合物的总量，是衡量食品或天然产物品质的重要指标之一。酚类化合物在植物中起到了保护自身免受外界环境侵害的作用，同时赋予植物独特营养价值[45]。酚类化合物对人类健康具有优异的抗氧化、抗菌、抗肿瘤、抗癌和神经保护作用[46−47]。不同产地及种植模式的铁皮石斛总酚含量见图 5。其中仿野生种植的 SH6（0.356%）和 SH8（0.347%）总酚含量最高，显著（$P<0.05$）高于大棚种植样本（0.068%~0.250%）。含量最低的为 SH3，仅为 0.068%，SH1（0.126%）和 SH2（0.122%）间无显著差异（$P>0.05$），但与其他的样本之间差异显著。李娟等[48] 优化了铁皮石斛总酚的提取测定条件，报道其平均含量在 0.548%，本研究与其报道的总酚得率相近。

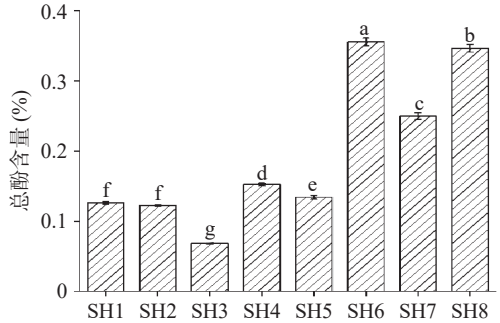


图 5 不同产地及种植模式铁皮石斛的总酚含量

Fig.5 Total phenol content of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

酚酸是植物源食品中天然存在的一类酚类物质，具有杀菌、抗氧化、抗毒素等作用[49]。如图 6 和表 4 所示（以原儿茶酸为参照峰），本研究检测了铁皮石斛中 8 种酚酸物质（原儿茶酸、没食子酸、对羟基苯甲酸、香草酸、对羟基苯丙酸、对香豆酸、阿魏酸和苯甲酸）的含量。结果表明，不同产地及种植方式的铁皮石斛酚酸存在差异。8 种样本均检出原儿茶酸、香草酸、阿魏酸和苯甲酸，其中苯甲酸含量普遍较高。8 份铁皮石斛中，仅 SH2 未检出没食子酸，SH3 和 SH5 未检出对羟基苯甲酸。而仅 SH2、SH3 和 SH6 检出对羟基苯丙酸，只在 SH4、SH6、SH7 和 SH8 检出对香豆酸，SH6 均能检出 8 种酚酸。

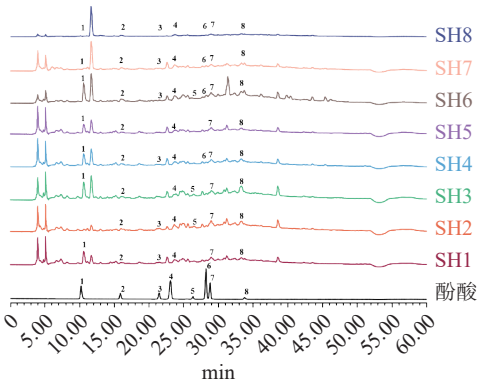


图 6 铁皮石斛酚酸组成色谱分析

Fig.6 Analysis of phenolic acid composition in *Dendrobium officinale* by chromatography

注：1：没食子酸；2：原儿茶酸；3：对羟基苯甲酸；4：香草酸；5：对羟基苯丙酸；6：对香豆酸；7：阿魏酸；8：苯甲酸。

表 4 酚酸组成相对含量分析

Table 4 Relative content analysis of phenolic acid composition

样品	酚酸组成及浓度比							
	原儿茶酸	没食子酸	对羟基苯甲酸	香草酸	对羟基苯丙酸	对香豆酸	阿魏酸	苯甲酸
SH1	1	3.450	1.347	0.850	–	–	2.133	9.833
SH2	1	–	1.299	0.720	3.405	–	2.019	9.982
SH3	1	2.629	–	0.542	2.604	–	1.659	14.908
SH4	1	2.319	0.665	0.540	–	0.131	1.110	7.735
SH5	1	2.004	–	0.465	–	–	1.038	8.863
SH6	1	1.969	0.182	0.461	1.671	0.204	1.130	5.533
SH7	1	0.255	0.629	0.503	–	0.118	0.620	2.505
SH8	1	0.215	0.188	0.364	–	0.082	0.737	4.398

注：“–”表示未达到定量限。

2.5 不同产地及种植模式铁皮石斛的抗氧化活性

DPPH 法是一种广泛应用于评价食品、中草药和其他物质的抗氧化活性的化学实验方法，通过检测抗氧化剂对 DPPH 自由基的清除能力间接评估其抗氧化活性[50]。本研究通过 DPPH 自由基清除实验来表征其抗氧化活性，以 Trolox 当量（mg Trolox/g）表示。如图 7 所示，不同产地及种植模式的铁皮石斛的 DPPH 自由基清除能力存在显著差异。仿野生 SH6 和 SH8 DPPH 自由基清除能力最突出，分别达到 4.667 mg Trolox/g、3.175 mg Trolox/g，显著高于

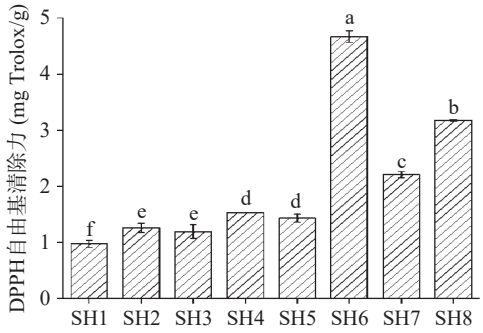


图 7　不同产地及种植模式铁皮石斛的 DPPH 自由基清除力

Fig.7　DPPH free radical scavenging power of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

其他大棚种植样品（P<0.05）。最低的为 SH1，仅为 0.9758 mg Trolox/g。SH2（1.259 mg Trolox/g）和 SH3（1.193 mg Trolox/g）间无显著差异，SH4（1.527 mg Trolox/g）和 SH5（1.431 mg Trolox/g）间亦无显著差异，但与其他样本之间差异显著。DPPH 自由基清除力整体上以浙产铁皮石斛（SH6~SH8）表现更为优异。自由基清除活性通常与黄酮、酚类物质呈现正相关[51]。本研究结果与前述总黄酮和总酚含量分布具有良好的一致性。

2.6　不同产地及种植模式铁皮石斛生物碱含量分析

生物碱是一种主要存在于植物中的活性物质，具有抗氧化、抗炎、免疫调节等多种作用，对治疗细胞损伤、保肝、镇痛、促进胃液分泌和助消化等方面也有功效[52−55]。石斛碱是石斛中一种特征性生物碱，其含量在铁皮石斛中的含量极低。研究表明，不同产地铁皮石斛的化学成分差异显著，即使在最佳生长期，铁皮石斛中石斛碱的含量也远低于金钗石斛等其他石斛品种，部分样本甚至无法检出[56]。如图 8 所示，不同产地及种植模式铁皮石斛的石斛碱含量有明显差异，其中 SH2 所含生物碱含量最高，为 33.44 μg/g。其次是 SH5，为 18.78 μg/g、SH3 为 15.27 μg/g、SH4 为 11.33 μg/g、SH1 为 3.14 μg/g。SH6、SH7 和 SH8 均未检出石斛碱，不具有差异性。

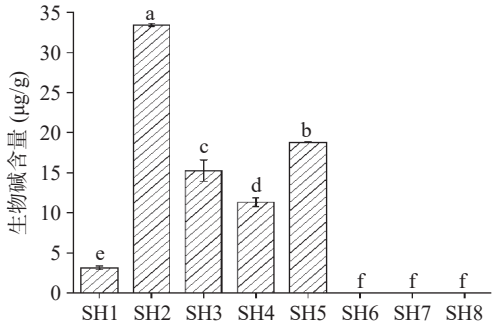


图 8　不同产地及种植模式铁皮石斛的生物碱含量

Fig.8　Alkaloid content of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

2.7　不同产地及种植模式铁皮石斛氨基酸含量

由表 5 所示，8 种铁皮石斛中均检测出 17 种氨基酸且各氨基酸含量存在差异。样本总氨基酸含量在 2413~3596 mg/100 g，由高到低排列顺序为：SH8>SH5>SH1>SH4>SH3>SH6>SH2>SH7。这些差异可能源于产地不同所造成的土壤矿物质和微气候差异，或由种植模式不同所带来的生物胁迫差异、水分和养分差异，它们通过调控植物代谢途径影响氨基酸合

表 5　不同产地及种植模式铁皮石斛的氨基酸含量（mg/100 g）

Table 5　Amino acid content of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes (mg/100 g)

氨基酸	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6	SH7	SH8
天冬氨酸（Asp）	613.11±3.74^{c}	457.62±5.59^{g}	589.00±3.38^{e}	599.48±9.47^{d}	683.22±3.32^{a}	489.64±7.02^{f}	430.38±10.31^{h}	622.91±1.31^{b}
谷氨酸（Glu）	492.20±0.38^{b}	353.22±10.88^{d}	449.19±5.96^{c}	451.45±2.07^{c}	539.06±4.36^{a}	441.03±4.89^{c}	356.87±7.83^{d}	527.42±18.56^{a}
丝氨酸（Ser）	128.25±2.25^{d}	106.25±4.22^{g}	124.03±2.32^{e}	120.24±0.28^{f}	132.35±0.89^{c}	141.20±2.56^{b}	109.07±0.36^{g}	163.89±1.18^{a}
组氨酸（His）	70.45±7.15^{ab}	58.67±2.69^{c}	76.22±4.25^{a}	64.74±5.31^{bc}	77.49±5.39^{a}	71.42±3.86^{ab}	61.14±4.67^{c}	70.65±3.55^{ab}
甘氨酸（Gly）	177.18±0.92^{c}	146.10±4.95^{g}	169.86±1.79^{e}	171.30±0.14^{de}	191.40±2.72^{b}	175.22±3.31^{cd}	151.45±4.96^{f}	222.88±3.44^{a}
苏氨酸（Thr）	147.70±1.71^{c}	115.30±5.43^{f}	139.23±1.46^{d}	132.17±0.27^{e}	159.72±1.89^{b}	135.52±5.22^{de}	114.97±1.95^{f}	168.75±4.7^{a}
精氨酸（Arg）	141.97±10.25^{b}	98.46±0.21^{f}	126.84±8.07^{cd}	130.06±0.63^{c}	145.77±2.46^{b}	118.63±0.47^{de}	108.29±14.43^{ef}	199.79±1.06^{a}
丙氨酸（Ala）	164.39±3.98^{c}	136.73±3.75^{e}	159.32±2.41^{c}	160.15±0.05^{c}	170.82±0.76^{b}	170.86±3.70^{b}	153.05±5.81^{d}	217.80±2.22^{a}
酪氨酸（Tyr）	69.58±5.77^{c}	54.94±1.98^{d}	58.78±0.52^{d}	69.87±4.30^{c}	100.91±12.46^{a}	69.69±1.82^{c}	59.45±0.29^{d}	85.94±4.00^{b}
半胱氨酸（Cys）	4.88±2.31^{ab}	5.10±0.10^{ab}	3.78±0.63^{bc}	5.46±1.16^{ab}	1.68±0.67^{c}	7.36±0.23^{a}	5.09±2.56^{ab}	3.36±1.13^{bc}
缬氨酸（Val）	186.84±2.08^{c}	151.84±5.94^{e}	174.74±1.42^{d}	186.30±2.43^{c}	194.29±1.65^{b}	175.99±0.19^{d}	151.39±5.07^{e}	225.36±3.53^{a}
蛋氨酸（Met）	15.26±2.19^{ab}	8.19±2.74^{c}	10.91±0.10^{abc}	15.32±1.46^{ab}	16.94±2.52^{a}	10.20±7.17^{abc}	11.69±2.34^{abc}	9.00±4.14^{bc}
苯丙氨酸（Phe）	176.25±9.26^{c}	140.77±1.48^{e}	167.88±1.28^{d}	180.29±8.35^{c}	202.09±2.64^{b}	173.38±1.78^{cd}	140.71±1.02^{e}	221.98±1.70^{a}
异亮氨酸（Ile）	163.87±0.13^{c}	132.09±3.38^{e}	153.42±0.98^{d}	162.03±0.91^{c}	176.35±2.27^{b}	151.60±1.19^{d}	132.41±3.28^{e}	197.06±2.98^{a}
亮氨酸（Leu）	322.42±0.32^{b}	245.06±3.66^{f}	295.91±2.18^{d}	313.45±1.52^{c}	352.96±1.92^{a}	269.52±3.02^{e}	231.61±1.28^{g}	352.22±4.62^{a}
赖氨酸（Lys）	128.86±2.23^{b}	104.17±3.44^{e}	111.09±1.79^{d}	122.57±1.62^{c}	131.44±2.00^{b}	98.45±0.86^{f}	81.77±1.34^{g}	172.50±4.92^{a}
脯氨酸（Pro）	117.53±1.84^{a}	112.31±2.57^{a}	119.06±3.33^{a}	116.13±6.23^{a}	124.300±3.92^{a}	122.13±1.61^{a}	114.23±2.01^{a}	135.23±39.19^{a}
必需氨基酸（EAA）	1141.21±10.03^{c}	897.43±20.58^{g}	1053.18±6.65^{e}	1112.12±6.42^{d}	1233.80±14.89^{b}	1014.66±13.01^{f}	864.56±11.60^{h}	1346.86±23.19^{a}
非必需氨基酸（NEAA）	1979.53±20.59^{c}	1529.41±32.79^{f}	1876.09±2.74^{d}	1888.88±16.42^{d}	2166.99±26.19^{b}	1807.20±3.63^{e}	1549.02±7.04^{f}	2249.86±24.54^{a}
总氨基酸含量（TAA）	3120.74±30.62^{c}	2426.84±53.37^{g}	2929.27±9.39^{e}	3001.00±10.00^{d}	3400.79±41.08^{b}	2821.86±9.38^{f}	2413.58±18.64^{g}	3596.73±1.35^{a}

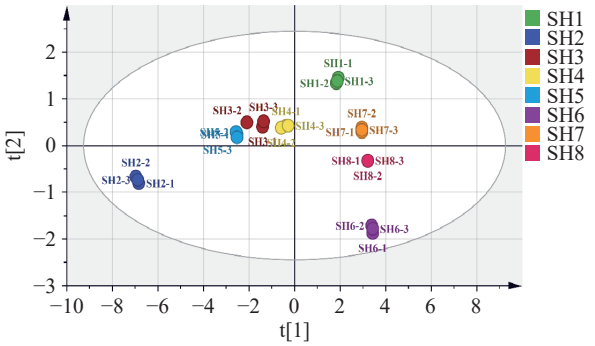
注：同行数据后不同字母表示有显著性差异（P<0.05）。

成。各样本中，天冬氨酸、谷氨酸和亮氨酸为含量最丰富的氨基酸，三者合计占比均超过总氨基酸含量的 40%，含量最低的为半胱氨酸，这一分布特征与罗绪强等[57] 的研究结果一致。

此外，在 8 种铁皮石斛样本中，EAA/TAA 值处于 35.82%~37.45%，其中 SH7 样本比值最低，SH8 比值最高。NEAA/TAA 值为 62.55%~64.18%。根据世界卫生组织（WHO）与联合国粮食及农业组织（FAO）所制定的理想蛋白质评判标准，优质蛋白质 EAA/TAA 值应维持在约 40% 的水平，NEAA/TAA 值需接近 60%[58]。结果表明，铁皮石斛富含高质量的蛋白质成分，具备较高的营养价值，可将其归类为优质蛋白质来源。

2.8 不同产地及种植模式铁皮石斛品质主成分分析

以 9 种铁皮石斛常见组分为因变量，不同产地及种植模式为自变量进行 OPLS-DA（图 9）。2 个主成分贡献率分别为 90.6% 和 6.32%，累计贡献率为 96.92%，基本可以反映样品整体信息。所建立的 OPLS-DA 模型 R^2X、R^2Y、Q^2 分别为 1、0.989、0.978，表示模型拟合优秀；为验证模型的可靠性，本研究采用置换检验法，对样本随机排序。结果显示，在进行 200 次的随机排列后，$R^2>Q^2$，且 Q^2 回归线的截距<0（图 10），说明该模型可以对数据进行有效预测，不存在过度拟合的问题。



$R^2X[1]=0.906$ $R^2X[2]=0.0632$ Ellipse: Hotelling's T2 (95%)

图 9 不同产地及种植模式铁皮石斛 OPLS-DA 载荷散点图

Fig.9 Scatter plots of OPLS-DA loads of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

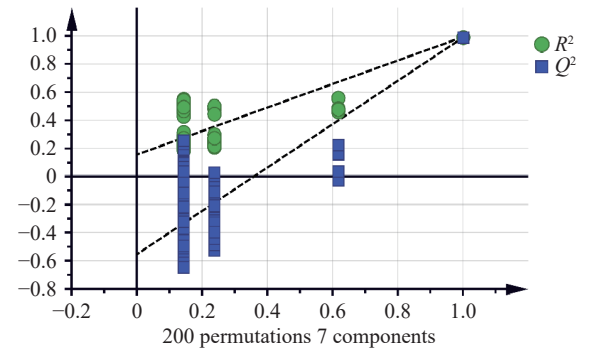


图 10 不同产地及种植模式铁皮石斛 OPLS-DA 模型的随机置换检验

Fig.10 Random permutation test of the OPLS-DA model of *Dendrobium officinale* in different origins and cultivation modes

从 OPLS-DA 因子载荷图可看出各样本能被有效区分，其中 SH3、SH4 和 SH5 集中在第二象限，聚为一类。SH1 和 SH2 距离其他样本均较远，而 SH7 和 SH8 较为接近，且这两者相较于其他样本更靠近 SH6。说明 SH7 和 SH8 在组成上相似程度高，且在所有样本中，二者与 SH6 成分最接近。这表明产地和种植模式对铁皮石斛的化学成分有显著影响，进而影响其品质和潜在的药理作用。

3 结论

本研究检测了 8 种铁皮石斛中的基础成分、活性物质及氨基酸含量等指标。结果表明，铁皮石斛营养组成稳定，多糖为其含量最丰富的活性物质，甘露糖和葡萄糖是其主要单糖组分；氨基酸种类齐全，且其比例符合理想蛋白质标准。仿野生种植模式下的铁皮石斛（如 SH6、SH8）多糖含量低于大棚种植模式，但其总黄酮、总酚、DPPH 自由基清除力和柚皮素含量均相对更高。

综上所述，不同产地及种植模式的铁皮石斛在营养物质的组成上表现出高一致性，但在具体营养成分和活性物质含量上存在显著差异。这些差异主要源于独特的地理环境、气候条件和土壤特性及栽培方式。深入了解上述差异对于铁皮石斛的选育和栽培模式优化至关重要。基于研究结果，SH5 与 SH7 样品富含多糖，SH6 与 SH8 在总黄酮和总酚含量上表现突出，因此可以充分利用这些样本的特性，针对性地开发满足不同药用和保健需求的产品，为铁皮石斛产业的精准化发展提供科学依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 卫梦尧. 石斛多糖的美白保湿功效研究及产品研发[D]. 广州：广东工业大学，2022. [WEI Mengyao. Research on whitening and moisturizing effects of *Dendrobium* polysaccharides and product development[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.]

[2] BAO H, BAO H N, WANG Y, et al. Challenges and strategies in the industrial application of *Dendrobium officinale*[J]. Plants, 2024, 13(21): 2961.

[3] XU Lei, ZENG Xiaoxiong, LIU Yanan, et al. Inhibitory effect of *Dendrobium officinale* polysaccharide on oxidative damage of glial cells in aging mice by regulating gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 247: 125787.

[4] ZHOU Wanyi, ZHENG Xiaojie, TAO Wenyang, et al. Potential gender- and age-specific prebiotic effects of three different *Dendrobium officinale* leaf polysaccharides on intestinal microbiota[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105446.

[5] FANG Jingyu, LIN Yang, XIE Hualing, et al. *Dendrobium officinale* leaf polysaccharides ameliorated hyperglycemia and promoted gut bacterial associated SCFAs to alleviate type 2 diabetes in

adult mice[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100207.
[6] LAI C H, HUO C Y, XU J, et al. Critical review on the research of chemical structure, bioactivities, and mechanism of actions of *Dendrobium officinale* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263: 130315.
[7] GUO Rongxiang, LIAO Jingru, SUN Yihang, et al. A review of advances in the extraction, structural characterization, gel properties, and biological activity mechanisms of *Dendrobium officinale* polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 311: 143756.
[8] WEI Yuan, WANG Linwei, WANG Dujun, et al. Characterization and anti-tumor activity of a polysaccharide isolated from *Dendrobium officinale* grown in the Huoshan County[J]. Chinese Medicine, 2018, 13(1): 47.
[9] REN Zhiyao, JI Xiaoyu, JIAO Zhenbin, et al. Functional analysis of a novel C-glycosyltransferase in the orchid *Dendrobium catenatum*[J]. Horticulture Research, 2020, 7: 111.
[10] GUO Qingbin, XIAO Xingyue, LU Laifeng, et al. Polyphenol–polysaccharide complex: Preparation, characterization, and potential utilization in food and health[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2022, 13: 59−87.
[11] LIU Jun, LU Jianfeng, KAN Juan, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity of phenolic acids grafted carboxymethyl chitosan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 62: 85−93.
[12] YONG Huimin, BAI Ruyu, BI Fengyu, et al. Synthesis, characterization, antioxidant and antimicrobial activities of starch aldehyde-quercetin conjugate[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 462−470.
[13] LIU Jun, PU Huimin, LIU Shuang, et al. Synthesis, characterization, bioactivity and potential application of phenolic acid grafted chitosan: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 174: 999−1017.
[14] BHATTACHARYA S, PAL S. Review on unraveling the relationship between abiotic stress and secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants[J]. Next Research, 2025, 2(2): 100320.
[15] CHAKRABORTY R, REHMAN R U, SIDDIQUI M W, et al. Phytohormones: Heart of plants' signaling network under biotic, abiotic, and climate change stresses[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 223: 109839.
[16] 张静芳, 何淑敏, 谢倩, 等. 铁皮石斛品质分析与评价指标的确定[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(6): 983−989,1001. [ZHANG Jingfang, HE Shumin, XIE Qian, et al. Quality analysis and evaluation indexes determination of *Dendrobium officinale*[J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(6): 983−989, 1001.]
[17] 仝晶晶, 虞泓, 曾文波, 等. 6 个不同产地铁皮石斛功效成分的分析研究[J]. 云南中医学院学报, 2017, 40(5): 81−84. [TONG Jingjing, YU Hong, ZENG Wenbo, et al. Study on functional components of *Dendrobium officinale* from different culturing areas[J]. Journal of Yunnan University of Chinese, 2017, 40(5): 81−84.]
[18] 丁玉莲, 林李雁, 陈丹青, 等. 一测多评法结合双波长法分析不同产地、栽培和加工铁皮石斛黄酮类成分的含量[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(14): 3605−3613. [DING Yulian, LIN Liyan, CHEN Danqing, et al. Content determination of six flavonoids in *Dendrobium officinale* stems from different producing areas, cultivation and processing methods by QAMS combined with dual-wavelength method[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(14): 3605−3613.]
[19] HE Shu, LU Zhengli, LI Rurui, et al. Chemical composition, antioxidant activity, α-glucosidase inhibitory activity, and metabolomic profiling of *Dendrobium officinale* across diverse growing regions and cultivation modes[J]. Food Bioscience, 2025, 68: 106714.
[20] 刘子菁, 从静文, 程卓, 等. 铁皮石斛多糖的提取工艺及对小鼠急性肺损伤改善作用的研究[J]. 中国药房, 2023, 34(22): 2745−2749. [LIU Zijing, CONG Jingwen, CHENG Zhuo, et al. Study on the extraction of polysaccharides from *Dendrobium officinale* and its improvement effect on acute lung injury in mice[J]. China Pharmacy, 2023, 34(22): 2745−2749.]
[21] 唐丽, 李菁, 龙华, 等. 不同生长龄铁皮石斛茎与叶中总多糖、总生物碱及总黄酮含量的差异[J]. 广东农业科学, 2015, 42(8): 17−21. [TANG Li, LI Jing, LONG Hua, et al. Content differences of total polysaccharides, total alkaloids and total flavonoids from stems and leaves of *Dendrobium* candidum at different growth ages[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(8): 17−21.]
[22] 张杨, 刘勇, 文博, 等. 陇南莱星油橄榄叶总多酚、总黄酮的分布规律及抗氧化活性[J]. 林产化学与工业, 2024, 44(6): 167−72. [ZHANG Yang, LIU Yong, WEN Bo, et al. Distribution patterns and antioxidant activity of total polyphenols and flavonoids in leccino olive leaves from longnan[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2024, 44(6): 167−72.]
[23] 陈晓霞. 石斛属植物高活性成分的检测与比较研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023. [CHEN Xiaoxia. Study on detection and comparison of high bioactive constituent in *Dendrobium* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023.]
[24] 尚艳, 胡慧敏, 赵振羽, 等. 福林酚比色法对保健食品中茶多酚含量的测定分析[J]. 中国食品工业, 2024(5): 89−91. [SHANG Yan, HU Huimin, ZHAO Zhenyu, et al. Determination and analysis of tea polyphenol content in health food by forminol colorimetric method[J]. China Food Industry, 2024(5): 89−91.]
[25] 周文雅. 玫瑰石斛功能成分与生物碱含量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019. [ZHOU Wenya. Study on functional components and alkaloid content of *Dendrobium crepidatum*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.]
[26] 杨玉亮, 衣大龙, 刘春雨, 等. 体外模拟消化对牦牛骨胶原蛋白肽抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 79−84. [YANG Yuliang, YI Dalong, LIU Chunyu, et al. Effects of *in vitro* simulated digestion on the antioxidant activity of yak bone collagen peptides[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 79−84.]
[27] 冯琳. 发酵枸杞汁的制备及解酒护肝功能的评价[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [FENG Lin. Preparation of fermented *Lycium barbarum* juice and its evaluation of anti-alcoholism and liver-protection[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
[28] XU Wenqian, CHENG Yuliang, GUO Yahui, et al. Effects of geographical location and environmental factors on metabolite content and immune activity of *Echinacea purpurea* in China based on metabolomics analysis[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115782.
[29] BOUJEMAA I, EL BERNOUSSI S, LAKHLIFI EL IDRISSI Z, et al. The impact of geographical location on the nutritional

quality, chemical composition, and antioxidant activity of *Cucurbita maxima* (rouge vif d'Etampes) seed oil[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2024, 115: 104835.
[30] ZHOU Hengpu, DONG Yingjie, WU Zhangyun, et al. Ultrasound-assisted enzyme extraction of *Dendrobium officinale* polysaccharides: Extraction process, characterization, immunomodulatory effects[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 114: 107248.
[31] LUO Qiulian, TANG Zhuanhui, ZHANG Xuefeng, et al. Chemical properties and antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from *Dendrobium officinale*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 89: 219−227.
[32] PAN Lihua, LI Xiufang, WANG Meina, et al. Comparison of hypoglycemic and antioxidative effects of polysaccharides from four different *Dendrobium* species[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64: 420−427.
[33] XIA Linjing, LIU Xiaofei, GUO Huiyuan, 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.
[34] 陈燕兰, 钟淳菲, 徐雅囡, 等. 不同地区铁皮石斛的品质差异研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 123−30. [CHEN Yanlan, ZHONG Chunfei, XU Yanan, et al. Study on quality differences of *Dendrobium officinale* in different areas[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(8): 123−30.]
[35] 黄俊彬, 丁婕, 朱海媚, 等. 三个不同种源的铁皮石斛多糖比较及其初步的药理活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 71−78. [HUANG Junbin, DING Jie, ZHU Haimei, et al. Comparison between three different origins of *Dendrobium officinale* polysaccharides and their initial pharmacological activity evaluations[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 71−78.]
[36] 于小芳. 不同产地、不同年限铁皮石斛多糖中单糖组成的 HPLC 分析[J]. 临床研究, 2022, 30(5): 36−9. [YU Xiaofang. HPLC analysis of monosaccharide composition in polysaccharides from *Dendrobium Officinale* with different origins and years[J]. Clinical Research, 2022, 30(5): 36−9.]
[37] CHEN H H, NIE Q X, HU J L, et al. Multiomics approach to explore the amelioration mechanisms of glucomannans on the metabolic disorder of type 2 diabetic rats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(8): 2632−2645.
[38] 佟岩, 黄荟, 王辉, 等. 铁皮石斛多糖合成相关基因在不同组织及低温胁迫下的表达分析[J]. 西部林业科学, 2021, 50(3): 20−27. [TONG Yan, HUANG Hui, WANG Hui, et al. Expression analysis of polysaccharide synthesis related genes in different tissues and low temperature stress on *Dendrobium officinale*[J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, 50(3): 20−27.]
[39] 张又元, 陈乃伟, 丁重阳, 等. 铁皮石斛茎部和叶部多糖的性质和活性[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(9): 959−965. [ZHANG Youyuan, CHEN Naiwei, DING Chongyang, et al. Characterization and bioactivity analysis of *Dendrobium officinale* stem and leaf polysaccharide[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2017, 36(9): 959−965.]
[40] 聂少平, 蔡海兰. 铁皮石斛活性成分及其功能研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 356−361. [NIE Shaoping, CAI Hailan. Research progress in bioactive components and functions of *Dendrobium officinale*[J]. Food Science, 2012, 33(23): 356−361.]
[41] ZHANG Yuan, ZHANG Lihong, LIU Jingjing, et al. *Dendrobium officinale* leaves as a new antioxidant source[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 37: 400−415.
[42] 孙凤婷, 许振岚, 朱作艺, 等. 铁皮石斛的黄酮类成分测定及其生物可及性研究[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(11): 2710−2719. [SUN Fengting, XU Zhenlan, ZHU Zuoyi, et al. Determination of flavonoids in *Dendrobium officinale* kimura et migo and study on its bioavailability[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(11): 2710−2719.]
[43] 徐丽红, 周鑫, 郑蔚然, 等. 不同仿野生栽培铁皮石斛多品质指标的比较[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(7): 1253−1257. [XU Lihong, ZHOU Xin, ZHENG Weiran, et al. Comparison on polysaccharides, d-mannose and crude fiber content of *Dendrobium officinale* in different imitation wild cultivation[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(7): 1253−1257.]
[44] 吕朝耕, 李佳兴, 蒋靖怡, 等. 浙产铁皮石斛不同生长期石斛酚、有机酸和黄酮类成分积累变化[J]. 中华中医药杂志, 2019, 34(5): 1989−1992. [LÜ Chaogeng, LI Jiaxing, JIANG Jingyi, et al. Dynamic changes of dendrophenol, organic acids and flavonoids in different growth periods of *Dendrobium officinale*[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2019, 34(5): 1989−1992.]
[45] KARAKAYA S. Bioavailability of phenolic compounds[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2004, 44(6): 453−464.
[46] WU Shutian, SHEN Danyu, WANG Ruohui, et al. Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129217.
[47] VU D C, VO P H, COGGESHALL M V, et al. Identification and characterization of phenolic compounds in black walnut kernels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(17): 4503−4511.
[48] 李娟, 麻晓雪, 李顺祥, 等. 铁皮石斛中总酚的含量测定[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(24): 60−62. [LI Juan, MA Xiaoxue, LI Shunxiang, et al. Determination of total phenols in *Dendrobii officinalis* caulis[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(24): 60−62.]
[49] TRINH P T N, TRI M D, AN N H, et al. Phenolic compounds from the rhizomes of *Drynaria bonii*[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2015, 51(3): 476−479.
[50] GULCIN İ, ALWASEL S H. DPPH radical scavenging assay[J]. Processes, 2023, 11(8): 2248.
[51] BŁOŃSKA-SIKORA E, ZIELIŃSKA A, DOBROS N, et al. Polyphenol and flavonoid content and antioxidant activity of *Hypericum perforatum* L. (st. John's wort) extracts for potential pharmaceutical and cosmetic applications[J]. Applied Sciences, 2025, 15(5): 2590.
[52] 王亚芸, 任建武. 石斛碱的研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版)2015, 46(1): 152−158. [WANG Yayun, REN Jianwu. The progress of study on Dendrobine[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 46(1): 152−158.]
[53] 严静, 蔡易熹, 陈燕兰, 等. 铁皮石斛茎、叶、花的活性成分及综合利用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(17): 299−306. [YAN Jing, CAI Yixi, CHEN Yanlan, et al. Research progress in

active components and comprehensive utilization of stems, leaves and flowers of *Dendrobium officinale*[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(17): 299−306.]

[54] CHEN Yue, WANG Yunzhu, LÜ Ping, et al. Comparative transcriptomic analysis reveal the regulation mechanism underlying MeJA-induced accumulation of alkaloids in *Dendrobium officinale* [J]. Journal of Plant Research, 2019, 132(3): 419−429.

[55] LIU Jing, ZHU Tao, NIU Qingqing, et al. *Dendrobium nobile* alkaloids protects against H_2O_2-induced neuronal injury by suppressing JAK–STATs pathway activation in N2A cells[J]. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 2020, 43(4): 716−724.

[56] 徐云燕, 王令仪, 黄彬, 等. 不同生长期金钗石斛和铁皮石斛中总生物碱及多糖的比较[J]. 华西药学杂志, 2014, 29(3): 288−91. [XU Yunyan, WANG Lingyi, HUANG Bin, et al. Comparison of contents of polysaccharides and alkaloids in *Dendrobium* from different harvest time[J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2014, 29(3): 288−91.]

[57] 罗绪强, 周金星, 张桂玲, 等. 黔产铁皮石斛不同部位多糖、氨基酸及必需元素含量[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 150−153. [ZHOU Xuqiang, ZHOU Jinxing, ZHANG Guiling, et al. The content of polysaccharides, amino acids and essential elements in different parts of *Dendrobium officinale* produced in Guizhou[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 150−153.]

[58] 刘凯月, 王湘闽, 陈肖英, 等. 5 种常见蔬菜氨基酸组成及营养评价[J]. 现代农业科技, 2023(2): 194−196,200. [LIU Kaiyue, WANG Xiangmin, CHEN Xiaoying, et al. Amino acid composition and nutritional evaluation of 5 common vegetables[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(2): 194−196,200.]