DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260511008
引用格式: 范蕊, 王文文, 汤兆星, 等. 中国西北地区枸杞形态生理性状及营养成分差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 249–258.
Fan Rui, Wang Wenwen, Tang Zhaoxing, et al. Analysis of differences in morphological, physiological characteristics and nutritional components of *Lycium barbarum* L. in the northwest region of China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 249–258. (in Chinese with English abstract).

中国西北地区枸杞形态生理性状及营养成分差异分析

范 蕊[1,2], 王文文[1,2], 汤兆星[1,2], 刘志义[1], 杨晓丽[1], 魏思佳[1], 田 合[1,2], 曹雪琴[1,2*]

(1. 新疆维吾尔自治区科技资源共享服务中心, 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 目的 系统评估地理风土塑造枸杞(*Lycium barbarum* L.)多维品质属性。**方法** 本研究针对甘肃(GS)、宁夏(NX)、青海(QH)及新疆(XJ)中国西北 4 大主产区的 95 份代表性枸杞样本进行了综合评估, 分析了形态、营养成分、风味代谢物和抗氧化能力, 并利用多元化学计量学手段进行了分析。**结果** QH 产区的果实纵径最为突出, 平均达到 21.86 mm, 显著高于其他产区(P<0.05); 而 XJ 产区的果实在纵径上相对较短(平均 16.40 mm); QH 产区表现出最高规格的商品性, XJ 产区紧随其后。4 个产区枸杞的基本营养成分分析, XJ 产区的样本表现出较低的水分含量(平均 12.39 g/100 g)和蛋白质含量(平均 12.86 g/100 g), 其灰分含量(20.15 g/100 g)显著高于其他 3 个地区, 粗脂肪含量(平均 0.61 g/100 g)在 4 个产区中最低, 维生素 C 含量相对较高。各产区枸杞均展现出良好的自由基清除能力, 但表现出不同的自由基偏好。感官品质在不同产区表现出显著的特征差异(P<0.05), XJ 产区的枸杞香气和口感显著高于其他地区(P<0.05), 色泽表现出明显的色素沉积异常或果皮褐变倾向。**结论** 不同产区间存在显著的形态分化, 这种变异受到遗传-环境互作的影响, 本研究识别出 12 个驱动区域分化的关键生物标记物, 为枸杞在不同生态环境下的产地溯源、品质标准化和品种筛选提供了科学依据。

关键词: 枸杞; 风土效应; 形态生理特征; 代谢谱; 产地溯源
中图分类号: TS201.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0249–10

Analysis of differences in morphological, physiological characteristics and nutritional components of *Lycium barbarum* L. in the northwest region of China

FAN Rui[1,2], WANG Wen-Wen[1,2], TANG Zhao-Xing[1,2], LIU Zhi-Yi[1], YANG Xiao-Li[1], WEI Si-Jia[1], TIAN He[1,2], CAO Xue-Qin[1,2*]

(1. *Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Resource Sharing Service Center*, *Urumqi* 830011, *China*; 2. *Xinjiang Key Laboratory of Featured Functional Food Nutrition and Safety Testing*, *Urumqi* 830011, *China*)

收稿日期: 2026-05-11
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发专项(2023B02009-3)
第一作者: 范蕊(1990—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为食品微生物及营养与安全。E-mail: 3047665049@qq.com
***通信作者:** 曹雪琴(1980—), 女, 博士, 正高级实验师, 主要研究方向为食品安全及天然产物。E-mail: 38658301@qq.com

ABSTRACT: Objective To systematically evaluate the multi-dimensional quality attributes of *Lycium barbarum* L. shaped by geographical terroir. **Methods** This study conducted a comprehensive assessment of 95 representative *Lycium barbarum* L. samples from the 4 major production areas in northwest China, namely Gansu (GS), Ningxia (NX), Qinghai (QH) and Xinjiang (XJ). The morphology, nutritional components, flavor metabolites and antioxidant capacity were analyzed, and the analysis was carried out using multiple chemometrics methods. **Results** The longitudinal diameter of the fruits in the QH region was the most prominent, averaging 21.86 mm, which was significantly higher than that in other regions (P<0.05). However, the fruits from the XJ region were relatively short in longitudinal diameter (averaging 16.40 mm); the QH region demonstrated the highest standard of commercial quality, followed closely by the XJ region. Analysis of the basic nutritional components of *Lycium barbarum* L. from 4 production areas: samples from the XJ production area showed lower moisture content (average 12.39 g/100 g) and protein content (average 12.86 g/100 g), and their ash content (20.15 g/100 g) was significantly higher than that of the other three regions. The crude fat content (average 0.61 g/100 g) was the lowest among the 4 production areas. The content of vitamin C was relatively high. *Lycium barbarum* L. from all production areas had demonstrated excellent free radical scavenging capabilities, but they showed different free radical preferences. The sensory quality showed significant characteristic differences in different production areas (P<0.05). The aroma and taste of *Lycium barbarum* L. from the XJ production area were significantly higher than those from other regions (P<0.05), and the color showed obvious abnormal pigment deposition or a tendency of browning of the fruit skin. **Conclusion** There are significant morphological differentiations among different production areas, and this variation is influenced by the interaction between genetics and the environment. This study identify 12 key biomarkers driving regional differentiation, providing a scientific basis for the origin traceability, quality standardization and variety screening of *Lycium barbarum* L. in different ecological environments.

KEY WORDS: *Lycium barbarum* L.; terroir effects; morpho-physiological traits; metabolic profiles; origin traceability

0 引 言

枸杞(*Lycium barbarum* L.), 茄科多年生落叶灌木, 药食同源经济作物, 广泛分布于中国西北干旱及半干旱地区, 形成了以甘肃(GS)、宁夏(NX)、青海(QH)及新疆(XJ)为核心的四大主产区[1]。枸杞富含多糖、类胡萝卜素、酚酰胺、倍半萜类及多种必需微量元素[2]。研究表明, 这些功能性组分的积累不仅表现出显著的品种特异性, 更对生境变化具有高度的敏感性。枸杞品质的形成是遗传潜力与光、温、水、盐碱等环境信号长期耦合的结果[3−4]。然而, 目前对于这种“遗传-环境”耦合如何具体驱动果实品质演化的机制仍缺乏系统性的量化解析。

在大尺度地理迁移过程中, 作物往往表现出极强的表型可塑性, 这种遗传与环境互作(gene×environment interaction, G×E)的现象在多种高价值经济作物中得到了广泛证实[5]。在葡萄的研究中, 从地中海气候区迁移至高海拔产区后, 强烈的紫外辐射诱导了苯丙烷途径的防御性激活, 使其花青素含量较原产地提升约 45%[6]。在油橄榄和咖啡的引种过程中, 研究者观察到其初级代谢产物(如脂肪酸比例)和次生代谢产物(如咖啡因与绿原酸的配比)发生了系统性偏移, 以应对非原产地的热胁迫或氧化应激[7−10]。这种性状重塑不仅体现在微观组分上, 往往还伴随着宏观形态的显著变化[6]。在干旱胁迫下, 植物常通过改变果实纵横比或单果重来优化“源-库”关系, 将有限的碳水化合物分配至防御系统(如抗氧化酶类及维生素积累), 以维持极端的细胞稳态[11]。

XJ 地处亚欧大陆腹地, 其特有的强辐射、极端温差(日温差常超 20 °C)以及普遍的盐碱土壤(pH>8.5), 构成了一个研究植物逆境响应的天然实验室[12−13]。针对 XJ 特色农业[如陆地棉(*Gossypium hirsutum* L.)和哈密瓜(*Cucumis melo* L.]的研究证实, 高胁迫环境会引发代谢分流, 使光合产物优先用于渗透调节和抗氧化化合物的合成, 而非单纯的营养生长[14−15]。尽管 XJ 拥有本土野生枸杞资源, 但目前的规模化产业基地主要依赖引种自 NX 产区的“宁杞”系列优良品种。当这些外来基因型置于 XJ 的极端生境下, 它们面临着严峻的生存挑战: 必须在形态结构与代谢通量之间建立新的动态平衡。这种协同演化背后的驱动是环境主导还是遗传控制以及外观品质与内在营养品质之间的补偿效应, 尚缺乏明确的科学论证[16−17]。因此, 本研究通过对不同产地枸杞品种的分析, 阐述了这种协同演变, 具有重要的现实意义。

本研究以 95 份代表性样本, 采用液相色谱法(liquid chromatography, LC)、理化分析法及体外抗氧化活性评价, 结合主成分分析(principal component analysis, PCA)、偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis,

OPLS-DA)等多元化学计量学手段，定量评估遗传与环境在综合品质演化中的贡献占比。以期为解析枸杞在极端生境下区域指纹图谱的构建、高适应性品种的筛选、非传统产区的品质精准调控以及枸杞的商业分级提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

枸杞样品采集于盛果期从 GS、NX、QH 及 XJ 4 个主要产区采集了 95 份具有代表性的枸杞样本，粉碎后置于 –20 °C 冰箱保存。

甲醇、乙腈(色谱纯，德国 Merck 公司)；氢氧化钠、95%乙醇、硫酸钾、石油醚(分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司)；盐酸、硫酸、硼酸(优级纯，广州化学试剂厂)；无水乙醇(分析纯，天津市鑫博特化工有限公司)；过硫酸钾[优级纯，福晨(天津)化学试剂有限公司]；甲酸(色谱纯)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2- picrylhydrazyl, DPPH)(纯度≥97.0%)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司)；2,2’-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2’-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS](纯度≥98.0%，上海源叶生物科技有限公司)；微孔滤膜(0.22 μm，上海安谱实验科技股份有限公司)；实验用水为一级水。

UN260 型电热恒温干燥箱(美墨尔特贸易有限公司)；BCE224l-1CCN 型分析天平[精密度 0.1 mg，赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]；F0610C 型高温马弗炉(重庆雅马拓科技有限公司)；8420 型全自动凯氏定氮仪(瑞典 Foss 分析有限公司)；Spectra Max i3 型多功能微孔板检测系统[美谷分子仪器(上海)有限公司]；B-811 型全自动索氏提取仪(瑞士 Buchi 有限公司)；Agilent 1260 型液相色谱仪(美国 Agilent 公司)；ACQUITY ACR 型高效液相色谱仪(美国 Waters 公司)；CAPECELL PAK MG S5 C_8 柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm，日本资生堂公司)。

1.2　实验方法

1.2.1　果实形态与商业等级评估

果实的外部形态参数通过数显卡尺随机测量每组 12 粒果实获得，记录其纵径(长度)和横径(宽度)并计算纵横比。商业分级标准参照 SN/0878—2000《进出口枸杞子检验规程》执行，包括测定每百粒果实的重量以及精确统计 50 g 样品中的果粒总数。所有形态学测量均重复 3 次，以量化产区环境对果实发育及市场分级指标的影响。

1.2.2　基础营养成分与维生素分析

蛋白质含量测定采用 GB 5009.5—2025《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法。粗脂肪含量测定采用 GB 5009.6—2025《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏提取法。水分含量的测定采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法。总灰分含量的测定采用 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的恒重法进行。维生素类组分的测定采用 GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》、GB 5009.86—2025《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》、GB 5009.84—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_1 的测定(含第 1 号修改单)》、GB 5009.85—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_2 的测定》中的高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)。

1.2.3　风味代谢物测定

有机酸(包括柠檬酸、琥珀酸、苹果酸、乳酸、富马酸及酒石酸)的检测参照 GB 5009.157—2016《食品安全国家标准 食品中有机酸的测定》执行。糖组分(葡萄糖和果糖)的分析采用酸水解结合 HPLC 柱分离法。准确称取 2.0 g 样品粉末，在 90 ℃水浴条件下进行多糖提取与水解处理，随后利用超纯水定容并通过微孔滤膜过滤后进样检测。仪器参考条件：色谱柱：CAPECELL PAK MG S5 C_8 柱(4.6 mm ×250 mm, 5 μm)。流动相：用 0.1%磷酸溶液-甲醇=97.5:2.5 (*V*:*V*)比例的流动相等度洗脱 10 min，然后用较短的时间梯度让甲醇相达到 100%并平衡 5min，再将流动相调整为 0.1%磷酸溶液-甲醇=97.5:2.5 (*V*:*V*)的比例，平衡 5 min。柱温 40 ℃；进样量 20 μL；检测波长 210 nm。

1.2.4　自由基清除能力评估

体外抗氧化活性通过 DPPH 自由基和 $ABTS^+$自由基清除法评估。称取 0.1 g 样品粉末于 5 mL 60%乙醇溶液中，利用超声波辅助提取 30 min。对于 DPPH 自由基测定，将待测液与 100 μmol/L 的 DPPH 乙醇溶液混合，在室温避光条件下反应 40 min，并在 516 nm 波长处测量吸光度。$ABTS^+$自由基清除实验则采用经由过硫酸钾激活生成的 $ABTS^+$储备液，检测样品在 734 nm 下的吸光度变化。自由基清除率根据吸光度降解程度计算，以评估各产区枸杞的氧化还原稳定性。

1.2.5　感官评价体系

由 5 名专业人员组成的评价小组在标准感官实验室对样本进行感官评定。评价采用 1~4 分等级制，具体准则如下：色泽从鲜红(4 分)至黑红(1 分)；气味从香气明显(4 分)至有异味(1 分)；滋味以较甜略带苦味为佳(4 分)，有异味计为 1 分；汁液、果面饱满度及果柄新鲜度(从绿到干枯)均按 4 至 1 分降序评分。每组评价后评价员均需用温开水漱口，以确保评价结果的客观性。

1.3　数据处理

数据处理利用 GraphPad Prism 10.1 进行描述性统计。产区间的显著性差异采用单因素方差分析进行检验，随后进行 Tukey 事后多重比较检验。相关性网络分析基于 Pearson 相关系数，仅保留显著性 $P<0.05$ 且绝对值$|r|\geq 0.3$ 的关联项，并使用 Gephi 0.10 进行可视化。在进行 PCA 和

OPLS-DA 分析前，所有原始数据均经过单位方差缩放处理。模型的预测能力通过 200 次置换检验进行验证，并结合变量投影重要性(importance of variable projection, VIP)大于 1.0 识别核心标志物。

2 结果与分析

2.1 果实形态特征与商品等级的变化分析

对不同产区枸杞样本的形态学参数进行分析，结果如图 1 所示，果实的纵径与横径在地域间存在显著差异(P<0.05)。QH 产区的果实纵径最为突出，平均达到 21.86 mm，显著高于其他产区(P<0.05)；而 XJ 产区的果实虽然在纵径上相对较短(平均 16.40 mm)，但其横径(宽度)表现出明显的发育优势，平均值达 8.96 mm，形成了“短宽型”的果实轮廓。这种形态上的分化在果实长宽比中得到了进一步印证：GS、NX 和 QH 产区的长宽比均大于 2.40，属于典型的“长果类”；相比之下，XJ 产区的平均长宽比仅为 1.83，属于“短果类”。

商业品质评价结果显示，不同产区的每 50 g 果粒数存在显著波动。QH 产区表现出最高规格的商品性，平均每 50 g 仅含 169.06 粒，全部样本均符合“特优级”标准。XJ 产区紧随其后，平均粒数为 191.24，其中 92.5%的样本达到了特优级标准。GS 与 NX 产区的粒数分布较广，平均值分别为 248.17 和 282.93，部分样本进入了特级甚至甲级序列。这一趋势在百粒重数据中得到了对应验证：GS 产区大部分品种的百粒重集中在 21.52 g 左右，NX 产区为 21.65 g，而 QH 和 XJ 产区的百粒重显著更高，分别达到 32.61 g 和 27.36 g。

通过对相同品种在不同环境下的表现进行追踪，如图 2 所示，结果显示了环境对遗传特性有塑造作用。宁杞 10 号(NQ10#)在 NX 原产地的百粒重仅为 22.12 g，而引种至 XJ 后，其百粒重显著跃升至 33.25 g，且长宽比从 QH 时期的 2.71 大幅降至 1.96。这种“增重并趋向圆润”的变化在 KX6082 品种中同样存在，其在 XJ 环境下的百粒重(34.26 g)明显优于其在 GS 的表现(26.70 g)。然而，并非所有品种都表现出对 XJ 环境的正向适应，如宁杞 7 号(NQ7#)在 XJ 环境下的百粒重仅为 13.45 g，且每 50 g 粒数高达 389 粒，其品质表现甚至低于 NX 原产地。这表明 XJ 虽然具备产出大果的资源禀赋，但品种的选择至关重要，NQ10#和 KX6082 展现出更优的环境适应性。

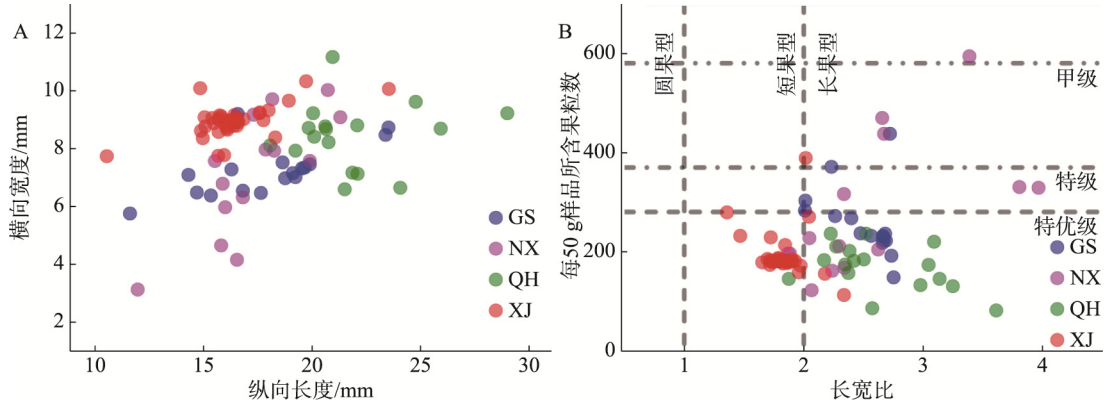
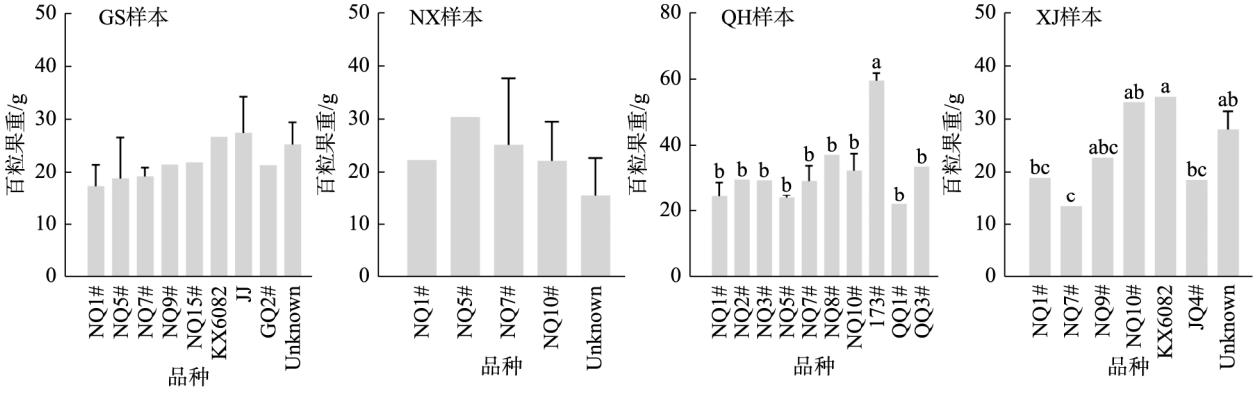


图 1 不同产区枸杞的形态特征与商品等级分析

Fig.1 Analysis of the morphological characteristics and commercial grades of *Lycium barbarum* L. from different production areas



注：不同小写字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)，图 3 同。NQ1#代表宁杞 1 号；QQ1#代表青杞 1 号；KX6082#代表科沁 6082 号；JQ4#代表精杞 4 号；以此类推。JJ 代表尖椒，GQ 代表甘杞，173#代表青海某品种，unknown 代表新疆、宁夏、甘肃某未知品种。

图 2 GS、NX、QH 和 XJ 不同品种间的百粒重差异分析

Fig.2 Analysis of differences in hundred-grain weight among different cultivars such as GS, NX, QH and XJ

2.2　营养成分、维生素含量及抗氧化能力的综合评价

4 个产区枸杞的基本营养成分分析结果如图 3, 区域风土对初级代谢产物的积累具有显著影响(P<0.05)。XJ 产区的样本表现出较低的水分含量(平均 12.39 g/100 g)和蛋白质含量(平均 12.86 g/100 g), 相较于 GS 产区的蛋白质水平(14.83 g/100 g)略有下降。然而, XJ 产区的灰分含量(20.15 g/100 g)显著高于其他 3 个地区(P<0.05)。此外, XJ 产区的粗脂肪含量(平均 0.61g/100 g)在 4 个产区中最低, 显著低于 NX 产区的 1.51 g/100 g (P<0.05), 这进一步体现出 XJ 枸杞高灰分、低脂肪的独特营养特征。在碳水化合物方面, 各产区均维持在较高水平, 其中 NX 产区最高(63.95 g/100 g), 而 XJ 产区(54.96 g/100 g)展现出与其他产区不同的能量分配模式, 这种差异可能与其特有的光热条件影响碳水化合物向次生代谢产物的转化有关。

维生素含量的测定进一步揭示了 XJ 枸杞作为功能性食品的潜力。尽管 XJ 产区的维生素 A (6.44 μg/100 g)和维生素 E (0.91 mg/100 g)均值低于 GS 产区, 但其维生素 C 含量相对较高, 平均达到 12.01 mg/100 g, 与 GS 产区(12.20 mg/100 g)相当, 并高于 NX 产区(10.32 mg/100 g)。这一结果表明, XJ 极端的昼夜温差和强紫外线辐射可能促进了果实中抗坏血酸的合成与维持。相比之下, 维生素 B 族在各产区间的差异较小且普遍处于较低水平, 反映出该类组分受遗传控制程度更高, 环境敏感性较低。

体外抗氧化活性评价结果显示, 各产区枸杞均展现出良好的自由基清除能力, 但表现出不同的自由基偏好。QH 产区 DPPH 自由基清除率为 8.19 mg/mL, XJ 产区 DPPH 自由基清除率(5.34 mg/mL)处于中等水平, NX 产区为 4.93 mg/mL, 其抗氧化活性高于 QH 和 XJ 地区。在 $ABTS^+$自由基清除实验中, XJ 产区的表现(1.77 mg/mL)与 QH 和 NX 产区(均在 1.80~2.00 mg/mL 之间)较为接近。这种抗氧化活性的差异通常与果实中的特定组分密切相关, 反映了 XJ 产区在维持高水平抗氧化防御体系方面的稳定性。

对风味代谢物(有机酸与糖类)进行聚类分析, 结果显示了 XJ 产区枸杞的风味特征。结果显示, XJ 产区的部分样本在柠檬酸和苹果酸等核心有机酸指标上表现出显著的正相关富集, 这赋予了 XJ 枸杞独特的酸甜平衡感。此外, 乳酸和富马酸在多数 XJ 样本中也表现出较好的积累趋势。与 NX 产区倾向于积累果糖和葡萄糖不同, XJ 枸杞通过较高水平的酸度调节, 形成了更为复杂的风味图谱。这种风味代谢物的重新分配, 揭示了引种 XJ 后, 枸杞在适应干旱、高盐碱环境过程中, 其内在品质发生的次生代谢演变。

2.3　营养组分与抗氧化活性的区域性关联网络分析

为了深入揭示不同产区枸杞内在品质因素间的互作机制, 研究采用了 Pearson 相关系数构建了代谢组分与抗氧化能力的关联网络(图 4)。在 GS 地区, 网络结构呈现出高度的代谢一致性, 特别是水分与碳水化合物之间表现出极强的正相关性(r=0.852, P<0.001), 暗示了该地区水分生理对初级代谢产物积累的直接调控作用。同时, DPPH 自由基清除能力与延胡索酸(r=0.548, P=0.012)以及 $ABTS^+$自由基清除能力(r=0.499, P=0.025)呈显著正相关, 表明在 GS 样品的抗氧化贡献中, 有机酸类代谢物可能发挥了重要协同作用。

NX 地区的关联网络则表现出更为紧密的糖代谢联动。数据显示, 果糖与葡萄糖之间存在极强的正相关(r=0.955, P<0.001), 反映了作为传统核心产区, NX 枸杞在糖分定向转化与积累过程中的高度稳定性。该产区的维生素 C 积累与琥珀酸(r=0.824, P<0.001)及乳酸(r=0.695, P=0.004)呈现显著正相关, 而抗氧化能力($ABTS^+$自由基清除率)与蛋白质含量之间却表现出强烈的负相关(r=–0.718, P=0.003), 这反映了 NX 地区独特的次生代谢物分配策略, 即抗氧化效能可能更多依赖于非蛋白类小分子物质的积累。

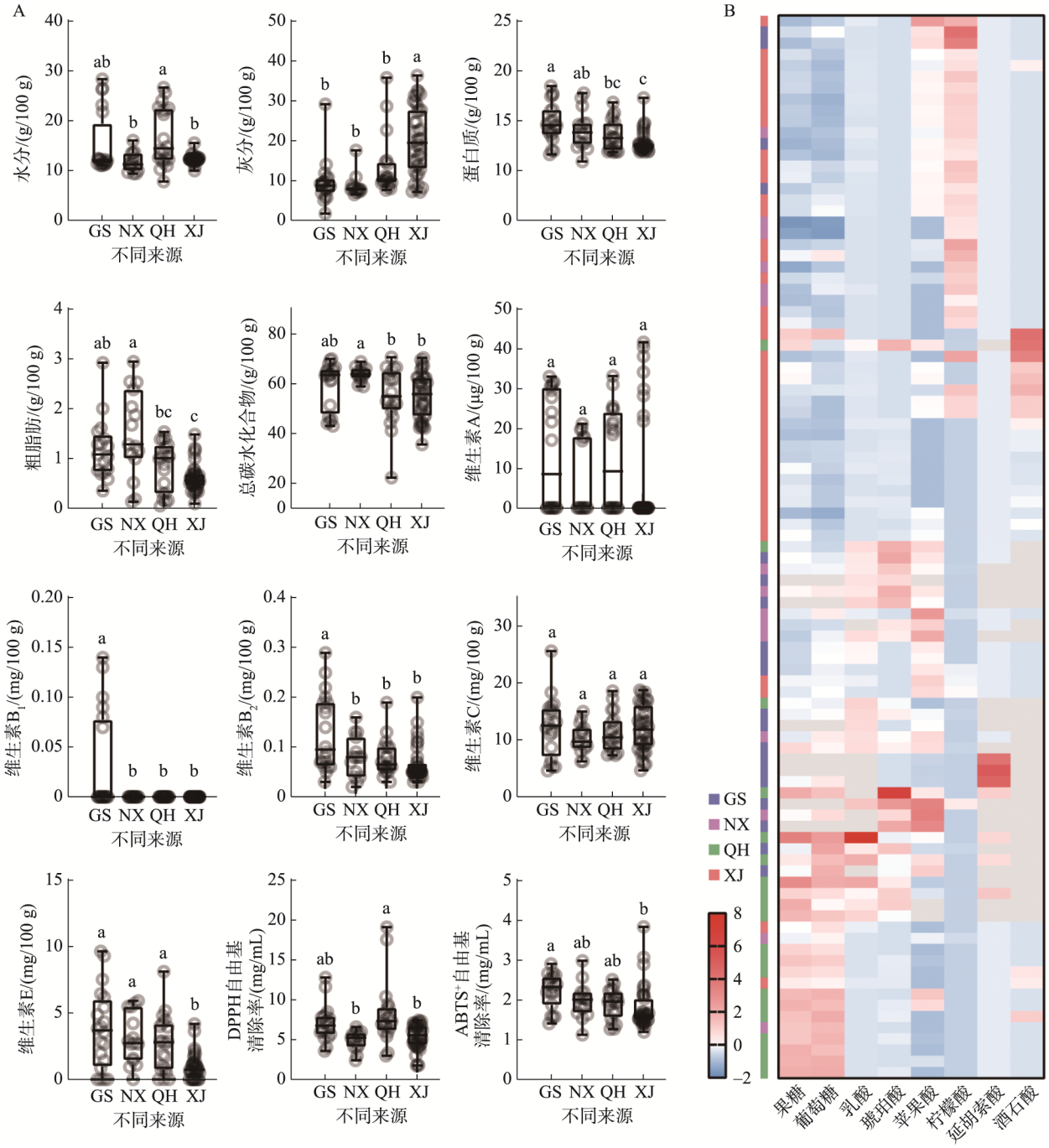
QH 与 XJ 地区的网络特征则体现了环境压力对代谢平衡的塑造。QH 样品的显著特征是维生素 C 与水分含量的协同演变(r=0.801, P<0.001), 且柠檬酸与酒石酸之间形成了极强的关联(r=0.798, P<0.001), 这可能归因于高海拔地区较低的气温减缓了酸类物质的呼吸消耗。相比之下, XJ 地区的网络显示出独特的矿质营养干扰模式, 灰分含量与碳水化合物之间存在极显著的负相关(r=–0.916, P<0.001), 这定量证实了前述关于 XJ 盐碱土壤条件下, 矿物质的高度富集可能对糖分的过度积累产生了某种“稀释”或代谢拮抗作用。然而, XJ 样品的蛋白质含量与 $ABTS^+$自由基(r=0.521, P=0.001)及 DPPH 自由基(r=0.429, P=0.006)均呈显著正相关, 这与 NX 产区截然相反, 暗示在 XJ 的极端干旱环境中, 含氮化合物(如含硫蛋白或多肽)可能是其抗氧化防御系统的核心组成部分。

2.4　枸杞感官品质评价与区域特征图谱分析

感官品质作为评价枸杞商品价值的直观标准, 在不同产区表现出显著的特征差异。对所有样本的总体感官评价显示(图 5), XJ 产区的枸杞在风味体验上表现出压倒性优势, 其气味得分高达 3.74, 滋味得分达 3.76, 显著高于 GS (3.14/3.14)、NX (3.07/3.14)和 QH (3.18/3.24)。此外, XJ 产区在汁液(1.74)和果面(2.74)方面也获得了最高评分。这种“浓郁香甜”的感官特征与前述代谢组学中 XJ 样品积累了更高水平的有机酸和特定糖类物质的研究结果高度吻合, 表明 XJ 独特的干旱气候与强光照环境显著提升了果实的风味浓郁度。

通过对特定品种在不同产区的适应性评价发现, 遗

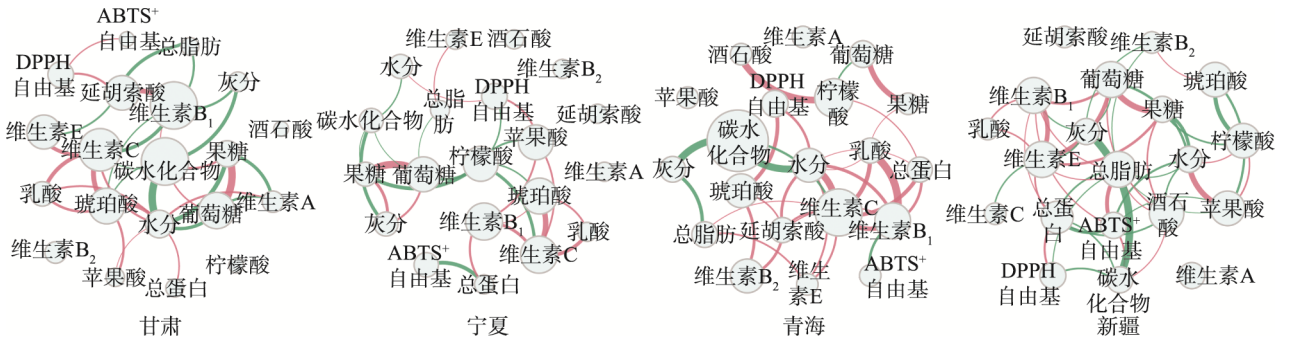
传背景与环境互作对感官性状的影响具有复杂性。对于 NQ1#而言，虽然其在 GS、NX 和 QH 产区的色泽表现优异(评分均在 3.00~3.50 之间)，但在 XJ 产区，其色泽评分降至 2.00，表现出明显的色素沉积异常或果皮褐变倾向。类似的情况也出现在 NQ7#中，该品种在 NX 原产地表现出最佳的综合感官平衡(色泽、气味、滋味均大于 3.25)，而引种至 XJ 后，其色泽评分同样跌至 2.00。对于 NQ10#，其在 NX 和 QH 表现出极佳的视觉吸引力(色泽得分分别为 3.50 和 3.33)，但在 XJ 的色泽表现依然欠佳(2.00)，尽管其气味和滋味仍维持在 3.00 的合格水平。



注：颜色刻度代表经 Z-score 标准化后的含量，灰色表示数据缺失。A 表示不同地区间枸杞营养成分及抗氧化活性之间的差异；B 表示不同地区间枸杞有机酸、糖类等风味代谢产物的差异。

图 3 不同产区枸杞营养图谱、维生素、抗氧化活性及风味代谢物的综合分析

Fig.3 Comprehensive analysis of nutritional profiles, vitamins, antioxidant activities and flavor metabolites in *Lycium barbarum* L. from different production areas



注：连线(边)表示显著相关(P<0.05)；为保证网络的视觉清晰度及生理相关性，网络中仅显示 Pearson 相关系数绝对值大于等于 0.3 (|r|≥0.3)的连线。红色连线代表正相关，绿色连线代表负相关。边的粗细与 Pearson 相关系数的绝对值成正比。

图 4　不同地区枸杞营养组分与抗氧化能力的 Pearson 相关性网络分析

Fig.4　Pearson correlation network analysis of nutritional components and antioxidant capacity of *Lycium barbarum* L. in different production areas

综合对比分析表明，XJ 环境虽然能显著赋予枸杞更佳的嗅觉和味觉品质，但对传统“宁杞”系列品种的视觉色泽呈现却具有一定的抑制作用。这暗示在 XJ 进行枸杞引种时，可以考虑筛选那些在极端光热条件下仍能保持鲜艳红色且能发挥 XJ 风味优势的特定品系。

2.5　基于多维指标的化学计量学评价与差异标志物筛选

综合评估形态、营养组分及感官性状对不同产区枸杞品质的影响，采用了 PCA 对 95 组样本进行了非监督性聚类。PCA 得分图显示，前两个主成分共解释了总方差的 41.4%，样本按地理来源呈现出明显的空间聚集趋势。其中，XJ 产区的样本在第一主成分(PC1)上与 GS、NX 和 QH 样本实现了相对分离。载荷图进一步揭示了驱动这一分离的核心变量：PC1 主要受苹果酸(载荷值 0.525)、乳酸(0.473)及琥珀酸(0.386)的正向驱动，而 PC2 则与 DPPH 自由基清除能力(0.631)及果糖含量(0.344)高度相关。这一分布特征表明，XJ 枸杞在代谢层面的独特性主要体现在有机酸谱图的重构，这与其在感官评价中展现出的独特风味属性高度一致。

为了进一步提取产区间的差异特征，研究构建了 OPLS-DA 模型。结果显示(图 6)，XJ 样本与其他产区样本之间存在极显著的区分，模型解释率 R^2Y 为 0.6754，预测率 Q^2 为 0.4157，表明模型具有良好的稳健性和分类预测能力。为验证模型是否存在过拟合，进行了 200 次置换检验，结果显示 R^2Y 的截距为 0.160，而 Q^2 的截距为–0.274，这种 Q^2 截距为负值的分布特征证实了该判别模型的有效性且无过拟合现象。

基于 OPLS-DA 模型的变量投影重要性分析，筛选出了 10 个驱动产区品质差异的关键标志物。其中，感官属性中的汁液(1.61)、果面(1.28)、气味(1.25)及滋味(1.25)位居前列，证实了 XJ 枸杞在商品性状上的差异核心。在理化指标中，灰分含量(1.52)和维生素 E (1.30)表现出极高的差异性，紧随其后的是果实长度(1.24)等。这组标志物构成了一个多维度的“产区指纹”，揭示了 XJ 环境如何通过影响矿物质富集(灰分)与果实形态发育，进而塑造出有别于传统产区的感官与营养特质。

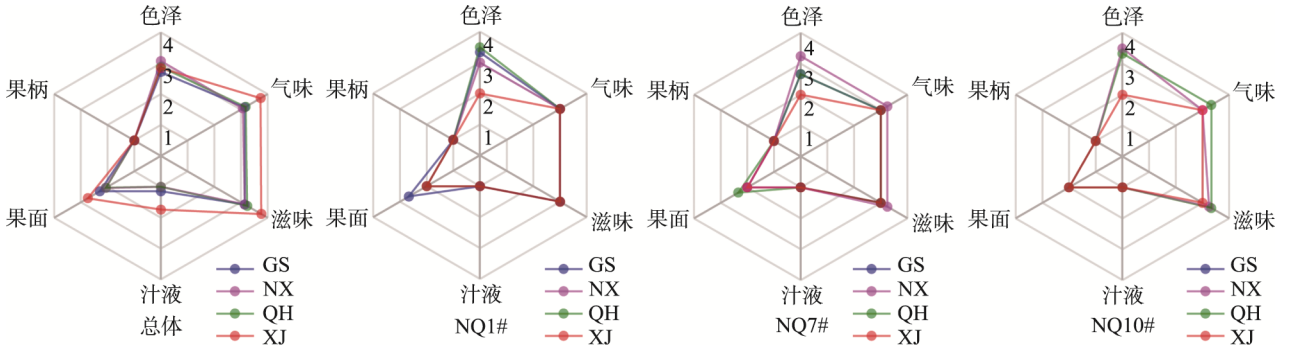
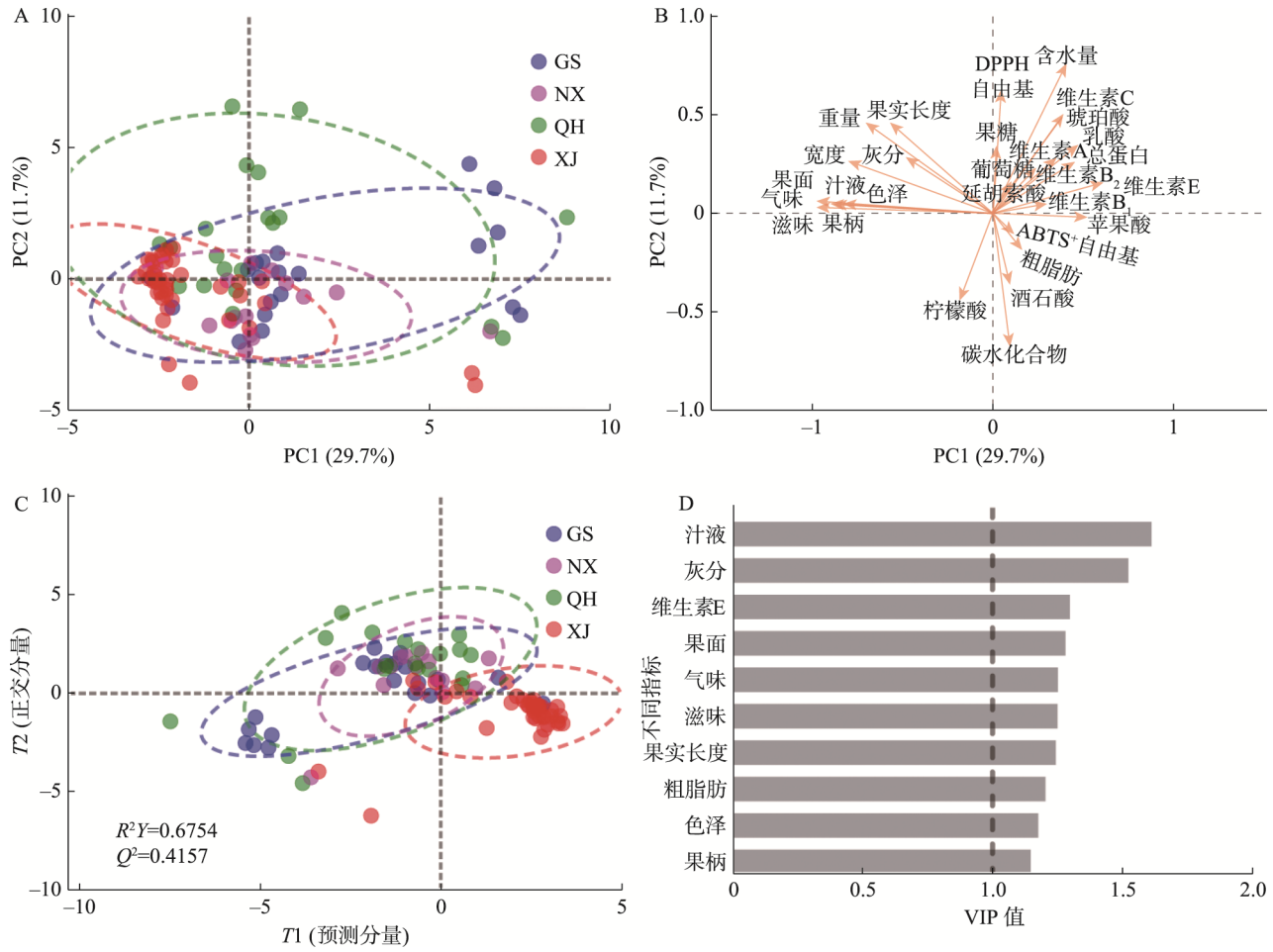


图 5　不同产区及品种枸杞的感官评价图谱

Fig.5　Sensory evaluation profiles of *Lycium barbarum* L. from different production regions and strains



注: A. PCA 得分图, 虚线椭圆代表 95%置信区间; B. PCA 载荷图; C. OPLS-DA 得分图; D. 基于 OPLS-DA 模型的 VIP 评分。

图 6 不同产区枸杞的多变量统计分析与差异标志物识别

Fig.6 Multivariate statistical analysis and biomarker identification of *Lycium barbarum* L. from different production regions

3 结论与讨论

本研究通过多维度评估, 分析了中国西北不同地理气候所构成的枸杞的生理及代谢差异特征。通过对 4 个主产区 95 份代表性样本的分析, 证实了枸杞的品质属性具有明显的地域特异性。研究结果表明, 不同产区枸杞在纵径、营养成分积累及感官特征等方面均表现出明显的产地差异。QH 产区果实纵径最大(21.86 mm), 商品性最高; XJ 产区纵径较短(16.40 mm), 商品性次之。营养成分上, XJ 产区水分(12.39%)和蛋白质(12.86%)含量较低, 灰分(20.15%)显著偏高, 粗脂肪(0.61%)最低, 维生素 C 较高。各产区枸杞均具良好自由基清除能力, 但自由基偏好不同, 说明抗氧化评价需多指标综合判断。感官方面, XJ 产区香气和口感最优, 但色泽存在色素沉积异常或果皮褐变倾向, 可能影响其高端市场竞争力。QH 产区以果大、商品性高见长; XJ 产区风味突出但色泽不足。产区差异是气候、土壤及加工方式共同作用的结果。建议 XJ 产区优化采收与干燥工艺以改善色泽,, 并建立兼顾外观、营养、抗氧化和感官品质的多维评价体系, 为枸杞优质栽培和定向加工提供依据。综合评估形态、营养组分及感官性状对不同产区枸杞品质的影响, XJ 枸杞在代谢层面的独特性主要体现在有机酸谱图的重构, 这与其在感官评价中展现出的独特风味属性高度一致。

果实形态是反映遗传特性与环境适应相互作用的核心表型性状之一[18]。本研究中, 果实几何特征显著分化, 从 QH 产区的“长果型”(平均 21.86 mm)到 XJ 产区特有的“短宽型”(纵横比 1.83), 凸显了枸杞显著的形态塑性。这种变异反映了 QH 高海拔产区的细长形态可能受益于较低的气温与气压。相比之下, XJ 产区表现出的“趋圆化”趋势(果实横径平均 8.96 mm)可能是对当地高蒸散及盐碱生境的适应性应答。从生理学角度看, 这种转变涉及渗透调节, 即植株通过积累溶质以维持水分, 从而诱发果实组织的侧向扩张[19–21]。

区域分化还表现在枸杞的营养成分差异上, 特别是矿物质富集与糖酸代谢的协同调整。XJ 枸杞样本中极高的灰分含量(20.15%)反映了其对盐碱土壤的生理应答, 即植

株通过吸收无机离子来调节细胞渗透压。这种矿物质积累与碳水化合物之间存在显著的“稀释效应”，表现为灰分与总碳水化合物之间的强负相关(r=–0.916)。这暗示了在盐碱胁迫下存在一种能量权衡，即通过矿物质富集来维持渗透稳定性，但这可能限制了碳流向糖类储备的分配。同时，XJ 枸杞展现出复杂的糖酸平衡特征。虽然 NX 产区保持着高水平的果糖和葡萄糖(63.95%)，但 XJ 样本以较高的有机酸含量为特征，这可能归因于当地剧烈的昼夜温差抑制了夜间有机酸的呼吸消耗。这些独特的矿物质与有机酸谱系提示，特定产区的生态条件重塑了枸杞的代谢框架。

不同地域产区间的抗氧化特征表明，维生素可能并非枸杞果实应对氧化损伤的唯一要素。在 XJ 产区，尽管存在强辐照压力，但其维生素 C 水平与其他产区相当，可能存在代谢补偿机制[22]。NX 产区的抗氧化能力主要与有机酸(如苹果酸)相关，而 XJ 枸杞抗氧化能力中蛋白质和粗脂肪组分发挥了更显著作用。XJ 产区蛋白质含量与 DPPH 自由基活性(r=0.429)、粗脂肪含量与 $ABTS^{+}$自由基活性(r=0.521)的正相关，与 NX 产区的模式形成显著差异(P<0.05)[23]。这表明在 XJ 剧烈的光热压力下，特定的应激响应蛋白(如热休克蛋白或富硫多肽)以及粗脂肪组分中的亲脂性抗氧化剂(如类胡萝卜素或特定脂肪酸)可能充当了清除活性氧的主要因子，这种组分间的功能补偿确保了其生理韧性[24–26]。

新疆环境虽然能显著赋予枸杞更佳的嗅觉和味觉品质，但对传统“宁杞”系列品种的视觉色泽呈现却具有一定的抑制作用。这表明在新疆进行枸杞引种时，可以考虑筛选那些在极端光热条件下仍能保持鲜艳红色且能发挥新疆风味优势的特定品系。新疆枸杞的分化是由结构与矿物质概况的重构所驱动的。特别是灰分含量极高，凸显了矿物质富集是新疆盐碱风土的核心判别特征。这种多维指纹图谱为产地溯源和品质标准化提供了强有力的工具。更重要的是，它为精准栽培提供了科学依据[27–30]。例如，KX6082 品系在新疆表现出的卓越适应性，即同时维持了高生物量和稳健的感官性状。这提示未来应避免对传统优良品种的简单移植，相反，筛选能够兼顾色素稳定性与风味增强的“生境匹配型”基因型，将是高盐碱荒漠地区枸杞产业高质量发展的关键。

参考文献

[1] 李静，余意，郭兰萍，等. 枸杞子品质区划研究[J]. 中国中药杂志，2019, 44(6): 1156–1163.
Li Jing, Yu Yi, Guo Lanping, et al. Study on quality regionalization of lycii fructus [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(6): 1156–1163.

[2] Zhang Qiuyun, Chen Weiwei, Zhao Jianhua, et al. Functional constituents and antioxidant activities of eight Chinese native Goji genotypes [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 230–236.

[3] Lin Shuang, Zeng Shaohua, Biao Biao, et al. Integrative analysis of transcriptome and metabolome reveals salt stress orchestrating the accumulation of specialized metabolites in *Lycium barbarum* L. fruit [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(9): 4414.

[4] 刘萍涛，杨涓，康建宏，等. 不同改良措施对盐碱地枸杞光合特性、产量和品质的影响[J]. 农业科学研究，2024, 45(2): 16–21, 26.
Liu Pingtao, Yang Juan, Kang Jianhong, et al. Effects of different improvement measures on photosynthetic characteristics, yield and quality of *Lycium barbarum* in saline-alkali land [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2024, 45(2): 16–21, 26.

[5] Hou Jing, Liu Meng, Yang Kai, et al. Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2025, 67(9): 2265–2293.

[6] Mansour G, Ghanem C, Mercenaro L, et al. Effects of altitude on the chemical composition of grapes and wine: a review [J]. OENO One, 2022, 56(1): 227–239.

[7] Li Peigang, An Zhenghong, Xu Nan, et al. Phenotypic plasticity and stability in plants: genetic mechanisms, environmental adaptation, evolutionary implications, and future directions [J]. Plant, Cell & Environment, 2025, 48(8): 5847–5860.

[8] Schneider R, Bäurle I, Nikoloski Z, et al. Plant phenotypic plasticity: from molecular mechanisms to breeding and climate change adaptation [J]. Annual Review of Plant Biology, 2026, 77(1): 707–731.

[9] Alseekh S, Klemmer A, Yan Jianbing, et al. Embracing plant plasticity or robustness as a means of ensuring food security [J]. Nature Communications, 2025, 16: 461.

[10] Mousavi S, de la Rosa R, Moukhli A, et al. Plasticity of fruit and oil traits in olive among different environments [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 16968.

[11] García-Inza G P, Hernández M L, Miserere A, et al. Transcriptional regulation of oil synthesis and fatty acid desaturation in olive fruit under elevated growth temperature [J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176: e14149.

[12] 梁晓婕，王亚军，李越鲲，等. 枸杞对盐碱胁迫响应机制的研究进展[J]. 宁夏农林科技，2020, 61(8): 20–23.
Liang Xiaojie, Wang Yajun, Li Yuekun, et al. Research progress of response mechanism of wolfberry to saline-alkali stress [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2020, 61(8): 20–23.

[13] 鲁晓宇，郭家鑫，陶一凡，等. 不同盐碱胁迫对棉花营养元素吸收转运以及代谢的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2023, 31(3): 438–451.
Lu Xiaoyu, Guo Jiaxin, Tao Yifan, et al. Effects of different salt and alkali stress on absorption, transportation, and meta-bolism of nutrient elements in cotton [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3): 438–451.

[14] 郭家鑫，鲁晓宇，陶一凡，等. 棉花在盐碱胁迫下代谢产物及通路的分析[J]. 作物学报，2022, 48(8): 2100–2114.
Guo Jiaxin, Lu Xiaoyu, Tao Yifan, et al. Analysis of metabolites and pathways in cotton under salt and alkali stresses [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(8): 2100–2114.

[15] 宋文. 冷胁迫下哈密瓜蛋白质组学分析及GST基因的鉴定[D]. 石河子：石河子大学，2021: 1–2.
Song Wen. Quantitative proteomic analysis and identification of GST genes in Hami melon under cold stress [D]. Shihezi: Shihezi University,

2021: 1–2.

[16] 聂芳, 琚艳君, 陈卓雅, 等. 枸杞营养品质时空变化规律及特征分析[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(3): 642–651.
Nie Fang, Ju Yanjun, Chen Zhuoya, et al. Spatial and temporal variation of nutritional quality and its characteristics of wolfberry [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(3): 642–651.

[17] 梁泽. 高 CO_2 对枸杞鲜果采后糖酸积累和酚类代谢调控作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 42–53.
Liang Ze. Study on the effect of elevated carbon dioxide on sugar, acid accumulation and phenolic metabolism in postharvest wolfberry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 42–53.

[18] 王亚军, 梁晓婕, 张波, 等. 产地差异对宁夏枸杞果实形态及糖分含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 68–75, 81.
Wang Yajun, Liang Xiaojie, Zhang Bo, et al. Effects of different habitats on the fruit morphology and sugar content of *Lycium* Barbarum L [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 68–75, 81.

[19] 孙蕾, 牟欢, 张红云. 新疆精河宁杞 1 号的外观品质与气象条件关系研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 139–143.
Sun Lei, Mou Huan, Zhang Hongyun. Study on the correlation between appearance quality of ningqi No. 1 and meteorological factors in Jinghe County, Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16(3): 139–143.

[20] 王亚军. ‘宁杞 1 号’枸杞品质对气象和土壤因子的响应机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 27–34.
WANG Yajun. ‘Ningqi 1’ Wolfberry quality response mechanism to meteorological and soil factors [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 27–34.

[21] 胡静, 胡小柯, 尉秋实. 黑果枸杞抗旱部分生理策略研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 183–189.
Hu Jing, Hu Xiaoke, Yu Qiushi. Drought resistance of *Lycium ruthenicum* in some physiological strategy [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(7): 183–189.

[22] Duan Wenwen, Zhang Zhijie, Zhu Jingjing, et al. Comparative analysis of the phenolic profile of *Lycium barbarum* L. fruits from different regions in China [J]. Molecules, 2022, 27(18): 5842.

[23] Gong Rongyi, Liu Yichen, Wu Xinyan, et al. Comparative metabolomics of *Lycium barbarum* seeds from different regions: variations in bioactive compounds and antioxidant potential [J]. Food Chemistry, 2026, 503: 147765.

[24] Xiong Lei, Deng Na, Zheng Bisheng, et al. HSF-1 and SIR-2. 1 linked insulin-like signaling is involved in Goji berry (*Lycium* spp.) extracts promoting lifespan extension of *Caenorhabditis elegans* [J]. Food & Function, 2021, 12(17): 7851–7866.

[25] Zhao Yonggang, Wu Xia, Zhao Huijuan, et al. *Lycium barbarum* polysaccharides loaded myocardial-decorating nanoplatform for precise treatment of myocardial injury induced by exertional heat stroke [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 354: 151468.

[26] Tian Shanming, Yu Yi, Liu Qian, et al. An integrated strategy for the geographical origin traceability of *Goji berries* by antioxidants characteristic fingerprint based online ultra-performance liquid chromatography-2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl-photodiode array detector-mass spectrometry combined with multivariate statistics analysis [J]. Journal of Separation Science, 2023, 46(7): 2200826.

[27] 黄婷, 万世园, 秦垦, 等. 宁夏枸杞鲜果感官评价与仪器分析及其相关性研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(15): 157–163.
Huang Ting, Wan Shiyuan, Qin Ken, et al. Study on sensory evaluation and instrumental analysis of fresh fruit of *Lycium barbarum* L. and their correlation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(15): 157–163.

[28] 张瑞, 苟春林, 王智, 等. 基于多种矿物元素的精河枸杞与中宁枸杞产地鉴别[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(3): 674–682.
Zhang Rui, Gou Chunlin, Wang Zhi, et al. Geographical origin discrimination of Jinghe wolfberry and Zhongning wolfberry based on multi mineral elements analysis [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(3): 674–682.

[29] 王彩艳, 开建荣, 李彩虹, 等. 基于矿物元素指纹技术的西北地区枸杞产地判别分析[J]. 经济林研究, 2023, 41(3): 187–196.
Wang Caiyan, Kai Jianrong, Li Caihong, et al. Discriminant analysis of wolfberry origin in northwest China based on mineral element fingerprint technology [J]. Nonwood Forest Research, 2023, 41(3): 187–196.

[30] 崔博, 赵志芳, 张珈宁, 等. 枸杞结构地区差异性研究[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(3): 127-132.
Cui Bo, Zhao Zhifang, Zhang Jianing, et al. Study on regional differences in the structure of goji berry [J]. Coal and Chemical Industry, 2022, 45(3): 127-132.

(责任编辑: 曹岱琳 范彩旭)