文章编号： 1008-9357(2026)01-0085-08 DOI： 10.14133/j.cnki.1008-9357.20251011001

基于稳定同位素的罗布麻纤维鉴别与产地溯源

蔡严飞[1]， 邓永龙[1]， 夏雨婷[1]， 王 颖[1]， 薛 梅[2]， 孙先会[2]， 买买提吐尔逊·阿布里孜[2]， 周惠敏[1]
（1. 新疆大学新疆智能与绿色纺织重点实验室，乌鲁木齐 830017；2. 新疆东纯兴纺织有限公司，新疆 图木舒克 843900）

摘 要： 罗布麻的鉴别与溯源长期面临两大症结：其一，罗布麻与亚麻等麻纤维在形貌和红外光谱上极为相似，导致传统方法鉴别力不足；其二，加工过程会显著改变罗布麻的物质组成，为产地溯源带来干扰。本文以不同加工工艺的罗布麻制品为研究对象，以亚麻为对照样，采用元素分析仪-同位素比值质谱仪（EA-IRMS）精确测定碳稳定同位素比值（$\delta^{13}C$）、氢稳定同位素比值（δD）、氧稳定同位素比值（$\delta^{18}O$），并结合主成分分析（PCA）、聚类分析及偏最小二乘判别分析（PLS-DA）等多种统计方法进行数据解析。研究表明，不同产地的亚麻呈现出独特的同位素指纹，这不仅实现了对加工方式和混纺情况的有效判别，更实现了对原料物种与产地的精准溯源。本文系统比较了不同加工工艺下罗布麻的同位素变化规律，证实稳定同位素技术能够有效区分罗布麻及其制品、鉴别加工方式并追溯原料产地，为天然纺织品的科学溯源与真实性鉴别提供了新的技术途径和关键数据支持。

关键词： 稳定同位素；罗布麻纤维；产地溯源；脱胶工艺；混纺纱线
中图分类号： TS121.8 **文献标志码：** A

Authentication and Geographical Origin Tracing of Apocynum Fiber Based on Stable Isotopes

CAI Yanfei[1], DENG Yonglong[1], XIA Yuting[1], WANG Ying[1], XUE Mei[2], SUN Xianhui[2], ABULIZI Maimaitituerxun[2], ZHOU Huimin[1]
（1. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent and Green Textile, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Xinjiang Dongchunxing Textile Co., Ltd., Tumushuke 843900, Xinjiang, China）

Abstract: The identification and traceability of Apocynum venetum have long been hampered by two major problems. First, Apocynum venetum's appearance and infrared spectrum is extremely similar to those of flax and other fiber plants, leading to insufficient discrimination by traditional methods. Second, the processing significantly alters the material composition of Apocynum venetum, causing interference in traceability. This study investigated Apocynum venetum products at different processing stages, with flax as the control sample, and uses an elemental analyzer-isotope ratio mass spectrometer (EA-IRMS) to accurately determine their carbon stable isotopes ratio ($\delta^{13}C$), hydrogen stable isotopes ratio (δD), and oxygen stable

收稿日期： 2025-10-11
基金项目： 新疆维吾尔自治区重大科技专项（2023A02001-2）；国家自然科学基金青年基金（22305206）
作者简介： 蔡严飞（2000—），男，江苏泰州人，硕士生，主要研究方向为功能纺织材料。E-mail: 15205260980@163.com
通信联系人： 周惠敏，E-mail: xjzhouhuimin@126.com
引用格式： 蔡严飞，邓永龙，夏雨婷，王 颖，薛 梅，孙先会，买买提吐尔逊·阿布里孜，周惠敏. 基于稳定同位素的罗布麻纤维鉴别与产地溯源[J]. 功能高分子学报，2026，39(1)：85-92.
Citation: CAI Yanfei, DENG Yonglong, XIA Yuting, WANG Ying, XUE Mei, SUN Xianhui, ABULIZI Maimaitituerxun, ZHOU Huimin. Authentication and Geographical Origin Tracing of Apocynum Fiber Based on Stable Isotopes [J]. Journal of Functional Polymers, 2026, 39(1): 85-92.

isotopes ratio ($\delta^{18}O$). Furthermore multiple statistical methods, including principal component analysis (PCA), cluster analysis, and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), were employed for data interpretation. The results show that flax from different origins presents unique isotopic fingerprints. These fingerprints not only effectively distinguish processing methods and blending situations but also accurately trace the raw material species and origin. This paper systematically compares the isotopic variation patterns of Apocynum venetum under different processing techniques, confirming that stable isotope technology can effectively distinguish Apocynum venetum and its products, identify processing methods, and trace the origin of raw materials. This work provides a new technical approach and key data support for the scientific traceability and authenticity identification of natural textiles.

Key words: stable isotope; apocynum fiber; origin traceability; degumming process; blended yarn

随着消费者对服饰舒适性的追求日益提升，罗布麻纺织品逐渐成为市场新宠，这一现象也推动着业界对罗布麻展开更深入的探索与研究。罗布麻又名红野麻，属夹竹桃科[1]，是一种生长在盐碱、沙荒地区的草本植物。由罗布麻纤维织成的织物有着麻的风格、棉的舒适和丝的光泽，对人体具有医疗保健作用[2]。

罗布麻作为一种具有优良吸湿透气性和抗菌保健功能的天然韧皮纤维[3]，近年来在高端生态纺织市场中受到广泛关注。然而，由于其纤维在形貌、手感及主要化学成分（如纤维素、半纤维素）方面与亚麻高度相似[4]，尤其在经过脱胶、漂白、混纺等工艺处理后[5-7]，其微观结构与光谱特征趋于一致，传统鉴别方法（如显微镜观察、红外光谱法）难以准确区分[8,9]，给市场监管与品质控制带来极大挑战。

近年来，稳定同位素技术因其能够记录生物在生长过程中与环境之间的物质交换信息，已被广泛应用于食品、农产品及纺织品的产地溯源研究。Meier-Augenstein 等[10] 利用多元素稳定同位素特征成功区分了不同产地的棉花样品，验证了稳定同位素在纤维产地溯源中的可行性。韩丽华等[11] 通过氢、氧、锶同位素分析，实现了对桑蚕丝产地的有效判别。Cai 等[12] 通过同位素溯源为蚕丝降解机理提供了有益的见解，为追踪丰富的纺织遗产提供了有益的参考。Lyu 等[13] 采用同位素比质谱（IRMS）对茧进行了不同程度的脱胶，以研究脱胶对茧稳定同位素的影响。然而，针对罗布麻的系统同位素研究较少，尤其缺乏对其在不同加工工艺条件下同位素变化的深入探讨。

本文通过分析罗布麻本色和白色纤维、罗布麻和棉的混纺纱线，以及我国新疆亚麻与法国亚麻的稳定同位素比值，揭示其同位素差异及影响因素。采用元素分析仪-同位素比值质谱仪（EA-IRMS）测定样品同位素比值，运用主成分分析（PCA）、聚类分析、偏最小二乘判别分析（PLS-DA）等方法进行数据解析，体现了稳定同位素技术在罗布麻纤维鉴别与产地溯源中的应用潜力。本研究为罗布麻纤维产地溯源提供了关键同位素参考依据，有望推动纺织行业产品产地溯源技术的发展。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

浓硫酸（H_2SO_4）：w=98.08%，四川西陇科学有限公司；氢氧化钠（NaOH，w≥96%）、双氧水（H_2O_2，w=96%）、次氯酸钠（NaClO，w=6%～14%）、无水碳酸钠（Na_2CO_3，w=99.5%）、亚硫酸钠（Na_2SO_3，w≥98%）、焦磷酸钠（$Na_4P_2O_7$，w≥99%）：阿拉丁生化科技股份有限公司；硅酸钠（Na_2SiO_3）：嘉善县优瑞耐火材料有限公司；渗透剂：JFC 型，江苏安乙化工有限公司；新疆罗布麻、新疆伊犁亚麻、法国亚麻：新疆东纯兴纺织有限公司。

1.2 脱胶处理

首先对纤维进行预酸处理，在 40 ℃ 下以 1∶30 的浴比（1 g 纤维用 30 mL 处理液处理），用 3.5 g/L 的 H_2SO_4 溶液和渗透剂（文中渗透剂质量占被处理纤维质量的 2%）处理 20 min；随后进行碱煮，经 8 g/L 氢氧化钠、3 g/L 碳酸钠、3 g/L 亚硫酸钠、2.5 g/L 硅酸钠、3 g/L 焦磷酸钠及渗透剂组成的混合碱液于 100 ℃ 下处理 90 min，浴比保持 1∶30；碱煮后以 70 ℃ 热水清洗 2 次，再进行第二次碱煮（工艺同前）；经水洗后进行酸洗，在常温下先用 1.84 g/L H_2SO_4 处理 5 min；再经冷水冲洗并施加机械外力，在 105 ℃下烘干 2 h 后备用[14]。

1.3 罗布麻纤维漂白方案

1.3.1 *双氧水漂白工艺流程和工艺参数* 脱胶后的罗布麻先经一次氧漂，然后二次氧漂，最后冷水冲洗至中性，

于 105 ℃ 烘干 2 h 后备用。

氧漂: 10 g/L 过氧化氢, 2 g/L 硅酸钠, 0.5 g/L 亚硫酸钠, 1.5 g/L 碳酸钠, 渗透剂, 温度 80 ℃, 时间 40 min, 浴比 1∶20。

二次氧漂: 8 g/L 过氧化氢, 2 g/L 硅酸钠, 0.5 g/L 亚硫酸钠, 1.5 g/L 碳酸钠, 渗透剂, 温度 80 ℃, 时间 40 min, 浴比 1∶20。

1.3.2　次氯酸钠漂白工艺流程和工艺参数　脱胶后的罗布麻先经氯漂, 接着水洗后氧漂, 最后用冷水冲洗至中性, 于 105 ℃ 烘干 2 h 后备用。

氯漂: 5 g/L 次氯酸钠, 3 g/L 乙酸, 温度 30 ℃, 时间 45 min, 浴比 1∶20。

氧漂: 8 g/L 过氧化氢, 2 g/L 硅酸钠, 0.5 g/L 亚硫酸钠, 1.5 g/L 碳酸钠, 渗透剂, 温度 80 ℃, 时间 40 min, 浴比 1∶20。

1.4　稳定同位素分析

1.4.1　样品的制备　将不同地区采集的麻纤维样品除杂后混匀, 获得原始样品。从原始样品中随机抽取 4 g 样品, 以确保实验的随机性和可靠性。将麻纤维样品置于 105 ℃ 的恒温干燥箱中干燥 2 h, 用研磨机将烘干后的样品研磨至粉末状, 然后将样品转移至 105 ℃ 的恒温干燥箱中继续干燥 3 h, 取出样品, 装入含五氧化二磷的干燥器中保存以供检测。

1.4.2　稳定同位素比值(δ)测试　碳稳定同位素比值($\delta^{13}C$): 取约 5 mg 样品, 通过元素分析-同位素比质谱仪(EA-IRMS)测定, 样品经 1 150 ℃ 氧化炉和 850 ℃ 还原炉完全燃烧为 CO_2, 经气相色谱柱在恒温条件下实现 CO_2 的基线分离, 氦气流量为 230 mL/min, 质谱载气流量为 100 mL/min。氢稳定同位素比值(δD)、氧稳定同位素比值($\delta^{18}O$): 取约 1 mg 样品, 利用高温(1 400 ℃)热解生成 H_2 和 CO, 经色谱分离后由高分辨质谱分析, 氦气流量为 200 mL/min, 质谱载气流量为 110 mL/min, 测试结果取 3 次平均值。

本文 δD、$\delta^{18}O$ 采用 VSMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)标准, $\delta^{13}C$ 采用 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite)标准[15]。

2　结果与讨论

2.1　罗布麻纤维同位素比值的影响因素

各种麻纤维及其制品的取样和分类如表 1 所示, 其中样品 1 进行了 6 次测试, 其余样品均进行了 3 次测试, 相应的稳定同位素比值箱型图如图 1(a,b,c)所示, 混纺纱线中的棉花同位素比值如图 1(d)所示。从原料到成品的关键加工环节, 如漂白和混纺, 均在 δD、$\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 等同位素指标上留下了明确的“过程指纹”。通过对比不同加工阶段的罗布麻样品以及罗布麻样品与亚麻样品的同位素组成, 可以说明同位素特征与样品类型、处理方式及产地密切相关。

表 1　各种麻纤维及其制品的取样和分类

Table 1　Sampling and classification of various hemp fibers and products

Sample number	Place of origin	Sample name
1	Xinjiang, China	Apocynum venetum fiber
2	Xinjiang, China	Apocynum venetum fiber (Oxygen bleaching)
3	Xinjiang, China	Apocynum venetum fiber (Chlorine bleaching)
4	Xinjiang, China	Natural apocynum venetum-cotton (3/7, mass ratio) blended yarn
5	Xinjiang, China	White apocynum venetum-cotton (3/7, mass ratio) blended yarn
6	Xinjiang, China	Natural apocynum venetum-cotton (5/5, mass ratio) blended yarn
7	Xinjiang, China	White robusta-cotton (5/5, mass ratio) blended yarn
8	Xinjiang, China	Flax fiber
9	France	Flax fiber

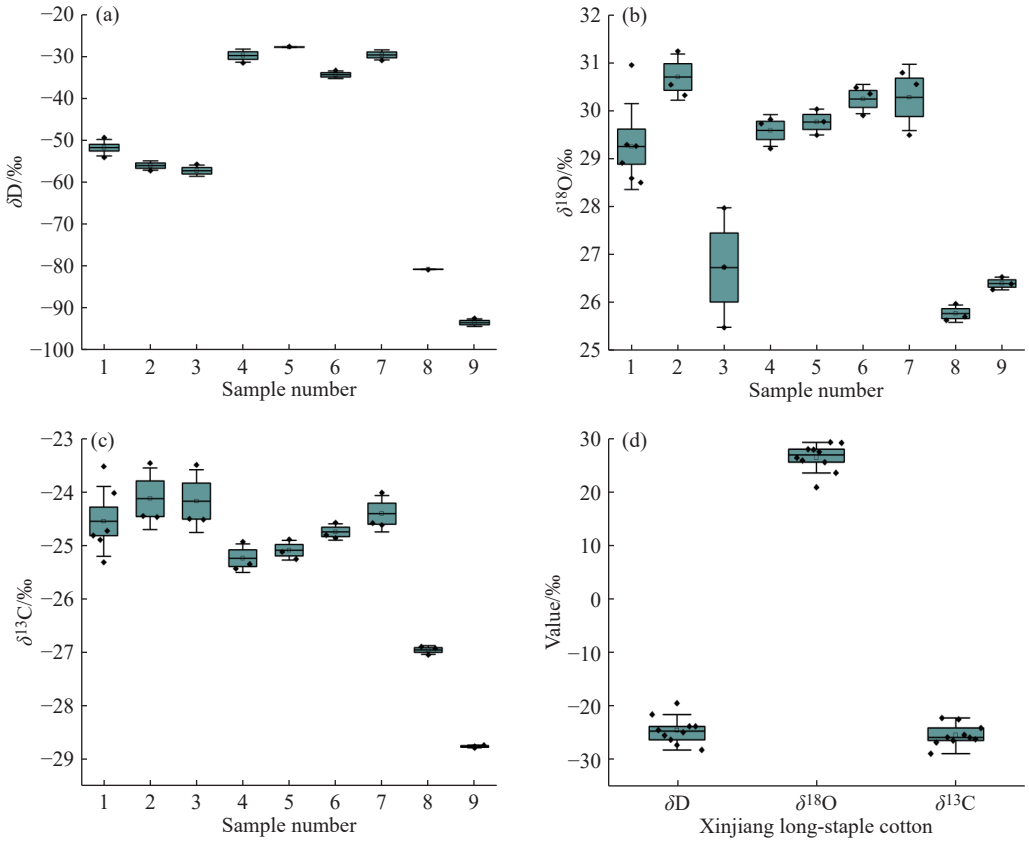


图 1 (a,b,c)各种麻纤维及其制品与(d)棉花的稳定同位素比值箱型图

Fig. 1 Stable isotope box plots of (a, b, c) various hemp fibers and their products and (d) cotton

2.1.1 漂白工艺的影响 本研究对比了氧漂和氯漂两种工艺对稳定同位素比值的影响。与未漂白的本色罗布麻纤维(样品 1, δD=−51.66‰±1.97‰)相比, 氧漂(样品 2, δD=−55.92‰±1.10‰)与氯漂(样品 3, δD=−57.15‰±1.34‰)处理均使 δD 略有降低, 但三者箱型图紧凑且区间重叠(−51.66‰～−57.15‰), 表明漂白处理虽引入了一定变化, 但并未改变其 δD 整体偏低的核心特征。结合棉纤维的 δD 数据, 罗布麻纤维的 δD 显著低于棉纤维的相应值。

漂白工艺对 δ^{18}O 的影响较为显著且具有方向性。未漂白纤维的 δ^{18}O 为 29.25‰±0.89‰, 经氧漂后显著升高至 30.70‰±0.48‰, 显示出氧同位素的富集效应; 而经氯漂后 δ^{18}O 则大幅降低至 26.73‰±1.24‰, 呈现出贫化效应。氧漂和氯漂会让罗布麻纤维中的羟基、羧基发生氧化反应。氧漂时, H_2O_2 中的氧原子会结合到纤维分子上, 导致 δ^{18}O 富集; 氯漂则会断裂纤维中的含氧基团(如纤维素中的醚键), 使轻氧同位素比值(δ^{16}O)得以保留, 呈现 δ^{18}O 贫化。两者反应方向相反, 分馏效应也相反。同位素分析为鉴别罗布麻制品是否经过漂白及区分漂白类型提供了强有力的依据。

未漂白、氧漂与氯漂罗布麻纤维的 δ^{13}C 集中在−24.55‰～−24.12‰的狭窄范围内, 证明漂白工艺未能改变其核心碳骨架结构, 碳同位素组成得以保留。

2.1.2 纺纱工艺的影响 纯罗布麻纤维(样品 1～3)的 δD 为−51.66‰～−57.15‰; 罗布麻-棉混纺纱(样品 4～7)的 δD 显著升高。混纺棉纤维后, 混纺纱的 δD 大幅升高, 与纯罗布麻纤维形成明显区分, 可作为识别“纯罗布麻”与“罗布麻-棉混纺”的氢同位素标志物。

纯罗布麻纤维(样品 1～3)的 δ^{18}O 为 26.67‰～30.70‰, 其中氧化漂白的罗布麻纤维(样品 2)氧同位素偏高; 罗布麻-棉混纺纱(样品 4～7)的 δ^{18}O 为 29.59‰～30.64‰, 与纯罗布麻纤维的高值区间相对重叠。混纺棉纤维后, 样品 4～7 的 δ^{18}O 趋于一致, 介于纯罗布麻与典型棉纤维的氧同位素比值之间, 弱化了因漂白带来的差异。

纯罗布麻纤维(样品 1～3)的 δ^{13}C 集中在−24.12‰～−24.55‰, 而罗布麻-棉混纺纱线的 δ^{13}C 在−24.40‰～−25.23‰, 较纯罗布麻纤维整体降低了 0.5‰～1.0‰, 这源于棉纤维与罗布麻纤维同为 C3 植物, 它们各自的

碳同位素组成有微小差异。当两者混合纺成线后, 测得的 $\delta^{13}C$ 是按混合比例计算出的一个中间值。

2.1.3　*亚麻的种属与产地差异*　氢同位素比值主要受植物生长过程中的水源以及蒸腾作用的影响, 不同地理区域的降水差异显著。我国新疆亚麻与法国亚麻的 δD 为−80.62‰～−93.31‰, 远低于任何罗布麻样品, 提供了最清晰的鉴别界限。

罗布麻和亚麻都是 C3 植物, 即使在同一光合作用途径中, 植物的 $\delta^{13}C$ 也受到水分、CO_2 浓度、温度以及酶活性等多种因素的影响, 从而在不同产地之间产生差异。亚麻的 $\delta^{13}C$ 为−26.95‰～−28.75‰, 显著低于罗布麻, 体现了种属差异; 同时, 法国亚麻与我国新疆亚麻之间近 2‰的差值, 提供了有效的产地判别依据。

植物的氧同位素组成受环境水体、大气水蒸气以及植物体内水分循环和同位素交换过程的综合影响, 由于亚麻和罗布麻的生长环境和生理特性不同, 其氧同位素组成也相应地存在显著差异[16]。亚麻的 $\delta^{18}O$ 在 25.77‰～26.40‰, 同样显著低于罗布麻群体, 进一步佐证了种属差异, 并与 δD、$\delta^{13}C$ 结论相互验证。

2.2　主成分分析

主成分分析是一种无监督的线性降维技术[17-19], 其核心目标是在信息损失最小的前提下, 将高维数据投影至低维正交空间, 使样本间的内在结构得以可视化并突出主要变异来源。

对罗布麻及其混纺样品、亚麻样品的稳定同位素比值与元素含量开展主成分分析能够清晰揭示样品的聚类特征及其关键驱动变量(PC1(解释 46.7% 变异)、PC2(解释 22.5% 变异))。从变量载荷分析(图 2(a))可知, 氢元素质量分数(w_H)、氧元素质量分数(w_O)、碳元素质量分数(w_C)以及 δD、$\delta^{18}O$、$\delta^{13}C$ 对主成分具有显著贡献。$\delta^{13}C$ 的载荷箭头沿 PC1 负轴延伸, 而 w_C 的载荷箭头沿 PC1 正轴延伸, 所以 $\delta^{13}C$ 较高且 w_C 较低的样品分布于 PC1 负轴区域, 反之则分布于 PC1 正轴区域, 进一步印证混纺样品与亚麻样品在碳相关指标上与纯罗布麻样品存在系统性差异, 这是导致聚类分离的原因。

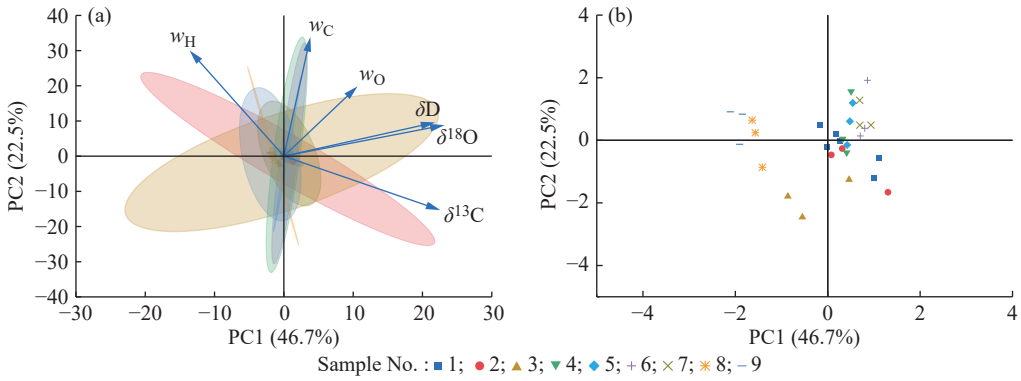


图 2　PCA 的 2D 图

Fig. 2　2D graph of PCA

以 PC1 和 PC2 构成的二维空间如图 2(b)所示, 纯罗布麻纤维(样品 1～3)主要聚集于 PC1 正轴和 PC2 负轴区域, 表现出较高的同质性; 罗布麻-棉混纺纱线样品(样品 4～7)则集中分布于 PC1 正轴和 PC2 正轴附近, 与纯罗布麻纤维形成明显分离; 不同地区的亚麻样品呈现相对独立的分布区域。上述分布格局表明, “是否与棉混纺”及“产地区位”是驱动样品差异分布的主要因素。

综上所述, PCA 有效区分了罗布麻、罗布麻-棉混纺样品及亚麻样品之间的差异, 为基于稳定同位素比值与元素组成进行纤维鉴别与产地溯源提供了可靠的数据支持, 也为后续相关样品的成因机制与应用研究奠定了分析基础。

主成分分析三维图(图 3)可全面揭示样品间的差异规律。在三维主成分分析图中, 以 PC1、PC2、PC3(解释 15.0% 变异)为轴构建的空间内, 不同类型样品呈现出明显的聚类特征。我国新疆亚麻与法国亚麻的散点分别分布在特定区域, 与罗布麻及其混纺样品有明显空间分隔, 体现出亚麻与罗布麻的种属差异及亚麻产地对样品特征的影响。

2.3　聚类分析

系统聚类分析作为多元统计分析中用于揭示样品或变量间亲疏关系的重要方法, 其谱系图(树状图)能够直观呈现不同样品的聚类过程与结果[20]。本研究基于平均联接法构建的谱系图, 对表 1 中的 9 个不同类型的

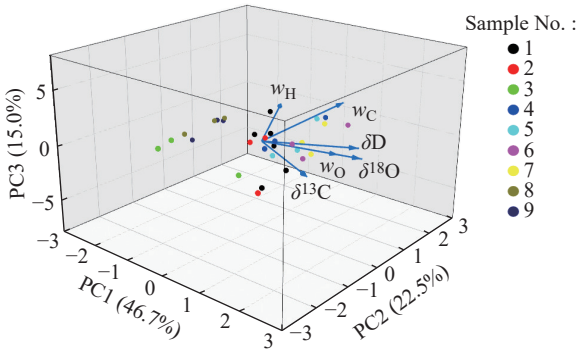


图 3 PCA 的 3D 图

Fig. 3 3D diagram of PCA

样品都进行稳定同位素测试，得到 30 组聚类分析数据(图 4)。从聚类结构来看，整体可清晰划分为三大主要聚类簇，各簇的形成与样品的类型、处理方式及种属差异密切相关。

第一大聚类簇主要包含罗布麻纤维、过氧化氢漂白罗布麻纤维、次氯酸钠漂白罗布麻纤维。在聚类过程中，这三类罗布麻纤维样品首先在较小的距离阈值下相互聚合，表明它们在稳定同位素比值与元素含量等指标上具有较高的相似性。

第二大聚类簇涵盖 3/7 本色罗布麻-棉混纺纱线、3/7 白色罗布麻-棉混纺纱线、5/5 本色罗布麻-棉混纺纱线、5/5 白色罗布麻-棉混纺纱线。这类样品在谱系图中于中等距离阈值下聚合为独立一簇，与第一大簇(纯罗布麻及漂白纤维)形成明显区分。这是由于混纺棉纤维后，改变了混纺纱线的稳定同位素比值与元素含量特征，使其与纯罗布麻纤维产生显著差异；同时，混纺样品内部不同配比、不同颜色(本色与白色)的样品，因棉纤维与罗布麻纤维的混合体系具有一定共性，体现出混纺样品的群体特征。

第三大聚类簇包括我国新疆亚麻和法国亚麻。该簇在较大的距离阈值下与前两大簇分离，说明亚麻样品与罗布麻及其混纺样品在指标上存在本质差异。我国新疆亚麻与法国亚麻虽同属亚麻，但在谱系图中也呈现出一定的细分聚类趋势，这可能与产地导致的生长环境差异有关。

系统聚类分析的谱系图清晰展现了罗布麻纤维(含漂白处理)、罗布麻-棉混纺纱线、亚麻(不同产地)三类样品的层级聚类关系，验证了样品类型、处理方式及物种产地对聚类结果的显著影响，为后续基于稳定同位素比值与元素含量的样品鉴别、溯源研究提供了直观且有力的聚类依据。

2.4 偏最小二乘判别分析

PLS-DA 作为一种有效的有监督模式识别方法，能够在最大化组间差异的同时，提取对分类贡献最大的成分，从而实现对不同样品的精准鉴别[21]。本文通过 PLS-DA 得分图(图 5)对样品展开深入分析。

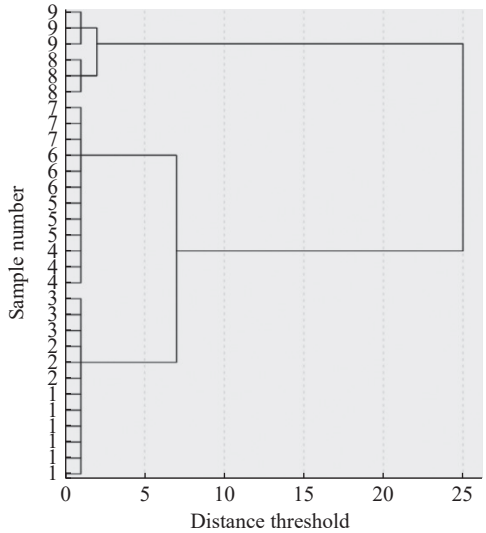


图 4 系统聚类分析谱系图

Fig. 4 System cluster analysis spectrum diagram

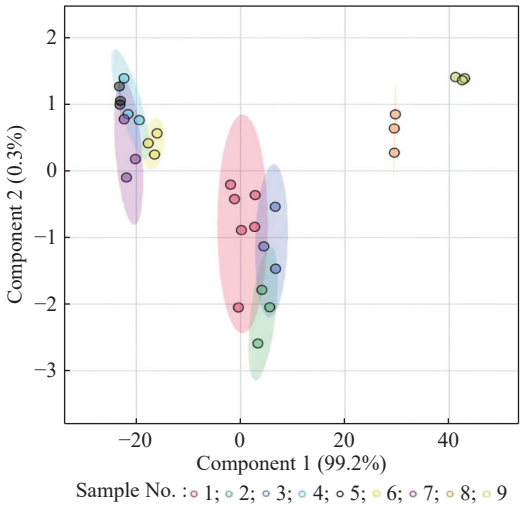


图 5 PLS-DA 得分图

Fig. 5 PLS-DA score graph

如图 5 所示, 第一主成分(Component 1)解释了 99.2% 的变异, 第二主成分(Component 2)解释了 0.3% 的变异, 前两主成分累计解释了绝大部分数据变异, 说明模型对数据的表征能力较强。不同类型样品在得分图中呈现出明显的聚类特征: 未漂白的本色罗布麻纤维(样品 1)、氧漂罗布麻纤维(样品 2)与氯漂罗布麻纤维(样品 3)的散点主要集中在 Component 1 中轴及正轴区域, 且三者相互重叠, 表明漂白处理虽会对罗布麻纤维产生一定影响, 但未从根本上改变其核心特征, 使得这三类纯罗布麻纤维样品在 PLS-DA 空间中具有高度的相似性; 罗布麻-棉混纺纱线样品(样品 4～7)的散点分布在 Component 1 负轴区域, 与纯罗布麻纤维(样品 1～3)沿 Component 1 轴明显分离, 这是由于混纺棉纤维后改变了混纺纱线的化学组成与稳定同位素比值, 使其与纯罗布麻纤维产生显著差异, 体现出混纺比例对样品特征的细微影响。我国新疆亚麻(样品 8)和法国亚麻(样品 9)的散点则分别聚集在 Component 1 正轴的不同区域, 与罗布麻及其混纺样品形成清晰的分隔, 反映出亚麻与罗布麻的种属差异, 且我国新疆亚麻与法国亚麻的散点也存在一定距离, 表明产地因素会导致亚麻样品在特征上产生分异。

PLS-DA 分析清晰地展现了罗布麻纤维(含漂白处理)、罗布麻-棉混纺纱线、亚麻(不同产地)样品间的差异, 为基于稳定同位素比值等指标的罗布麻及相关样品的鉴别与溯源提供了有力的技术支撑。

3　结　论

(1)氧漂使罗布麻纤维的 $\delta^{18}O$ 从 29.25‰升高至 30.70‰, 而氯漂则使其降低至 26.73‰, 表明不同漂白剂引起相反的氧同位素分馏效应。混纺棉纤维后, 体系的 δD 显著升高, $\delta^{13}C$ 也进一步降低, 证实混纺棉纤维后是改变同位素特征的关键因素。

(2)罗布麻纤维的 $\delta^{13}C$ 集中于−24.12‰～−24.55‰, 而我国新疆亚麻与法国亚麻的 $\delta^{13}C$ 分别为−26.95‰与−28.75‰, 存在显著差异。此外, 不同产地的亚麻表现出独特的同位素指纹, 如法国亚麻的 δD(−93.31‰)明显低于我国新疆亚麻(−80.62‰)。

(3)PCA 分析表明, PC1(46.7% 贡献率)主要受 δD、$\delta^{18}O$、$\delta^{13}C$ 驱动, 能有效区分纯罗布麻、混纺纱线及亚麻样品; PLS-DA 模型进一步实现对不同产地亚麻的精确判别, 为罗布麻及其制品的科学鉴别与溯源提供了可靠的数据方法与理论支撑。

参考文献:

[1] 孟润菁, 陈英, 张世双. 不同采收期罗布麻纤维的变化及脱胶工艺 [J]. 印染, 2024, 50(12): 21-25.
MENG R J, CHEN Y, ZHANG S S. Changes in Apocynum venetum fibers at different harvesting periods and their degumming process [J]. Dyeing & Finishing, 2024, 50(12): 21-25.

[2] 郭晶, 沈兰萍, 宋红. 罗布麻结构与性能及应用研究 [J]. 山东纺织科技, 2019, 60(1): 49-51.
GUO J, SHEN L P, SONG H. Study on the structure, properties and application of Apocynum venetum [J]. Shandong Textile Science & Technology, 2019, 60(1): 49-51.

[3] 谭燕玲, 徐原, 朱静. 罗布麻的性能与现状研究 [J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(1): 16-18.
TAN Y L, XU Y, ZHU J. Research on the properties and current status of Apocynum venetum [J]. Light and Textile Industry and Technology, 2021, 50(1): 16-18.

[4] 顾秦榕, 谢春萍, 王广斌, 刘坚, 张颖. 罗布麻纤维结构与性能测试研究 [J]. 丝绸, 2017, 54(2): 11-15.
GU Q R, XIE C P, WANG G B, LIU J, ZHANG Y. Study on the structure and performance testing of Apocynum venetum fiber [J]. Silk, 2017, 54(2): 11-15.

[5] GONG J, ZHANG Q, LOU J, LIU J, ZHANG Y, WANG G, XIE C. Investigation of the degradation of bio-recalcitrance in Apocynum venetum fiber biodegumming [J]. Journal of Natural Fibers, 2019, 16(1): 1-12.

[6] 崔赛赛,喻红芹,姜黎.罗布麻性能及脱胶研究进展 [J].纤维素科学与技术, 2025, 33(2):66-70.
CUI S S, YU H Q, JIANG L. Research progress on the properties and degumming of Apocynum venetum [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2025, 33(2):66-70.

[7] LOU J, YAO L, QIU Y, LIU J, ZHANG Y, WANG G, XIE C. The chemical degumming process and effect on the composition,

structure and properties of Apocynum venetum [J]. Textile Research Journal, 2020, 90(1): 3-9.

[8] AIBIBAIHAN M, BONG X, MAO Y L, ABUDUREXITI A, HE J. Study on infrared spectrum fingerprint of Apocynum venetum L. in Xinjiang based on double index analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(3): 757-763.

[9] 黄晶. 亚麻纤维近红外光谱分析及其应用研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
HUANG J. Near-infrared spectroscopy analysis of flax fibers and its application research [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.

[10] MEIER-AUGENSTEIN W, KEMP H F, SCHENK E R, LAM R. Discrimination of unprocessed cotton on the basis of geographic origin using multi-element stable isotope signatures [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2014, 28(5): 545-552.

[11] 韩丽华. 稳定同位素技术在桑蚕丝织溯源中的应用研究初探 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
HAN L H. Preliminary study on the application of stable isotope techniques to the traceability of mulberry silk textiles [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018.

[12] CAI Y L, HE Y J, HUANG J, JIA L L, JIA R, JIAO J P, LI H, LIU Y, PENG Z Q, WANG B, WENG Y, XIA R T, YANG D, YANG H L, ZHANG J C, ZHENG H L, ZHOU Y. Structure and stable isotope ratios of ancient and artificially aged silk fabrics [J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 218: 110576.

[13] LYU G, JIA L, CAI Y, YANG D, WANG T, FU J, LI T, WANG B, ZHOU Y, PENG Z. Influence of degumming conditions on the stable isotope composition of silk [J]. J Archaeol Method Theory, 2025, 32(63): 1-21.

[14] 王靖. 亚麻短纤的脱胶、漂白及柔软工艺研究 [D]. 上海: 东华大学, 2007.
WANG J. Study on degumming, bleaching and softening processes of flax short fiber [D]. Shanghai: Donghua University, 2007.

[15] AERTS-BIJMA A T, VAN BUUREN A C, PAUL D, MEIJER H A J. The absolute $\delta^{18}O$ value for SLAP with respect to VSMOW reveals a much lower value than previously established [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2024, 38(6): e9678.

[16] LI Q, ZHU X, ZHANG Y. Stable isotope fingerprinting discriminates the geographical origin of Gastrodia elata: Insights into $\delta^{2}H$-$\delta^{18}O$ co-fractionation and environmental Correlations [J]. Microchemical Journal, 2025, 219: 115898.

[17] ROSSMANN A. Determination of stable isotope ratios in food analysis [J]. Food Reviews International, 2001, 17(3): 347-381.

[18] ABDI H, WILLIAMS L J. Principal component analysis [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(4): 433-459.

[19] GREENACRE M, GROENEN P J F, HASTIE T, IZENMAN A, MINCHIN P, TUZGILINA E. Principal Component Analysis [J]. Nature Reviews Methods Primers, 2022, 2(1): 100.

[20] RONG Y, LIU Y. Staged text clustering algorithm based on K-means and hierarchical agglomeration clustering [C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). IEEE, 2020: 124-127.

[21] NOBLET C, LESTREMAU F, DERMIGNY A, FISCHER A, LEOZ-GARZIANDIA E, ALBINET A. Discrimination of Euro 5 gasoline vs. Diesel light-duty engine primary and secondary particle emissions using multivariate statistical analysis of high-resolution mass spectrometry (HRMS) fingerprint [J]. Aerosol Research Discussions, 2025(3): 1-31.

（责任编辑：王吉晶）