基于生态适应性的西藏亚麻栽培技术研究

常子惠，拉巴扎西，黄海皎，白玛央珍

（西藏自治区农牧科学院农业研究所，西藏 拉萨 850032）

摘　要：为探究西藏高原特殊生态条件下亚麻高产优质栽培的关键调控因素，采用3因素随机区组设计，系统分析品种（LY14、LY15、LY17）、播期（4月18日、5月8日）与播种量（800～2 100粒/行，折合12.3 - 32.2 kg/667 m²）对亚麻产量及品质的影响。结果表明：播期为影响产量的关键因素（$p=0.0177$），LY15在早播条件下平均产量最高，达122.3 kg/667 m²。通过回归分析确定最优播种量为1 833粒/行（折合28.1 kg/667 m²），预测最高产量为171.2 kg/667 m²（$R^2=0.672$）。品质分析显示，LY17的α-亚麻酸含量（611.88 mg/g）与总生物碱含量（0.51 mg/g）均显著优于其他品种。研究结果为西藏地区亚麻生态适应性栽培及品质定向生产提供了理论依据与技术支撑。

关键词：亚麻；播期；播种量；品质性状；生态适应性

中图分类号：S563.2　　**文献标识码**：A

Research on cultivation techniques of *Linum usitatissimum* based on ecological adaptability in Xizang

Chang Zihui，Labazhaxi，Huang Haijiao，Baimayangzhen

（Institute of Agriculture，Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences，Lhasa Xizang 850032，China）

Abstract：To explore the key regulating factors for high-yield and high-quality flax cultivation under unique plateau ecological conditions of Xizang，a three-factor randomized block design was adopted to analyze the effects of variety（LY14，LY15，LY17），sowing date（April 18，May 8）and seeding density（800－2100 seeds per row，equivalent to 12.3－32.2 kg/667 m²）on flax yield and quality.The results showed sowing date was the dominant factor affecting yield（$p=0.017\ 7$）. The variety LY15 produced the highest average yield under early sowing treatment，reaching 122.3 kg/667 m². Regression analysis determined the optimal seeding density at 1833 seeds per row（28.1 kg/667 m²），with a predicted maximum yield of 171.2 kg/667 m²（$R^2=0.672$）. Quality test results indicated LY17 had significantly higher α-linolenic acid（611.88 mg/g）and total alkaloid content（0.51 mg/g）than other varieties. This study provides theoretical basis and technical guidance for ecologically adaptive and quality-oriented flax production in Xizang.

Key words：*Linum usitatissimum*；sowing date；seeding rate；quality traits；ecological adaptability

西藏地处青藏高原核心区域，农业生态系统以强烈的紫外线辐射、显著的昼夜温差和短暂的无霜期（仅120～140 d）为典型特征。这些独特的自然条件不仅塑造了其鲜明的农业生产特点，也导致了系统对气候变化的高度敏感性与内在的生态脆弱性[1]。这种“高寒、低氧、强辐射”的极端环境，使农作物普遍面临生育期压缩、耕地资源稀缺、环境胁迫与生态退化的多重挑战[2]，

收稿日期：2025－11－12

基金项目：西藏自治区农牧科学院农业研究所统筹项目（NYSTC202502）。

作者简介：常子惠（1995—），女，硕士，研究实习员，主要从事农作物种质资源鉴定与评价研究，E-mail：changzihui1995@163.com。

通信作者：白玛央珍（1999—），女，本科，研究实习员，主要从事油菜育种与栽培研究，E-mail：2163342351@qq.com。

常规农业栽培技术适配性不足，亟需构建高原特化栽培模式。

亚麻 *Linum usitatissimum* 凭借优异抗逆性与经济价值，在西藏展现出广阔的应用前景。其相对较短的生育期，可完美匹配西藏无霜期限制，同时亚麻对低温环境的适应性，也为高原种植提供了生理基础[3]。

在西藏成功种植亚麻的关键方法，在于破解品种、播期与密度 3 大核心栽培因素的协同适配难题。首先，品种选择是基础，高原特殊光温条件可能重塑作物生理代谢路径，进而影响品质性状形成，因此筛选高产、优质、高抗逆的适宜基因型迫在眉睫[4]。其次，播期的确定具有特殊生态意义，它不仅直接调控产量形成，还可能通过改变籽粒灌浆期的光温资源分配，影响品质构成[5]。此外，播种密度决定群体结构合理性，在高原光温资源受限的背景下，构建“资源充分利用且个体竞争适度”的群体结构，是实现高产优质的核心[6]。

尽管单一因素的重要性已得到认可，但三者在高原环境下对产量与品质的综合效应及交互作用研究仍未见报道。仅聚焦单一因素或仅关注产量的研究，难以支撑综合生产实践。对“因素间协同/拮抗作用及其产量－品质关系的影响”缺乏深入理解，已成为技术突破的关键掣肘[7]。本研究立足西藏高原特殊生态环境，通过系统的田间试验，综合解析不同品种、播期与播种密度对亚麻产量的调控效应，旨在明确其最优配置组合。研究将运用现代统计分析方法，构建产量与关键栽培措施的量化关系模型，深入剖析各因素及其交互作用对产量的贡献率，为西藏亚麻优质高产栽培提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 主要试剂、仪器、试验材料及试验地概况

主要试剂：无水乙醚、异辛烷、氢氧化钾、无水甲醇、硫酸氢钠等均为分析纯；去离子蒸馏水。

主要仪器：安捷伦 7890A-5975B 气相色谱－质谱联用仪、灵巧型中草药粉碎机、索氏抽提器、真空旋转蒸发装置、旋涡振荡仪。

供试材料为甘肃省农业科学院引进品种陇亚 14、陇亚 15 和陇亚 17，试验在西藏自治区农牧科学院农业研究所 4 号试验地内进行，该地海拔3 670 m，年平均气温 7.4 ℃，年降水量 440 mm，无霜期 120 d，降雨量集中在 6－9 月，年日照时数 3 000 h。试验地为水浇地，排灌通畅，土质为砂壤土，有机质 1.59%、全氮 0.1%、碱解氮 72.0 mg/kg、全磷 0.069%、速效磷 37 mg/kg、全钾 1.99%、速效钾 16.8 mg/kg，前茬作物为豌豆。

1.2 试验设计

采用 3 因素随机区组设计，3 次重复，3 个因素分别为：因素 A（品种），设 LY14、LY15 和 LY17 共 3 个水平；因素 B（播期），设 4 月 18 日和 5 月 8 日两个水平；因素 C（播种量），设 800、1 200、1 500、1 800 和 2 100 粒/行（分别折合 12.3、18.4、23.0、27.6 和 32.2 kg/667 m^2）5 个水平。小区面积为 22 m^2，采用 6 行区种植。于成熟期每小区实收计产，记录小区产量（kg/22 m^2），并折算为每 667 m^2 产量（kg/667 m^2）。同时，每个品种取代表性籽粒样品，用于品质性状分析。

1.3 品质测定方法

亚麻籽经中草药粉碎机破碎，称取过 40 目筛的亚麻籽粉 5 g 于索氏抽提器中，用 50 mL 无水乙醚回流提取 6 h，冷却过滤，于真空旋转蒸发器上回收溶剂至干，得亚麻籽油。

气相色谱分离参数：安捷伦 HP-88 毛细管柱，100 m×250 μm×0.25 μm；进样口温度 260 ℃；起始温度 140 ℃，保持 5 min；以 4 ℃/min 升温至 240 ℃后保持 20 min；载气为高纯氦气，恒定流量为1 mL/min；进样方式为分流进样，分流比 10∶1；进样量为 1 μL。

质普检测参数：电离方式 EI，电离能量为 70 eV，离子源温度 230 ℃，扫描范围为 45～500 aum，质谱标准库；NIST14 库，采用峰面积归一化法计算各成分的相对百分含量。

1.4 数据分析

以 Python3.8＋为数据分析平台，通过多工具协同完成统计分析与可视化，所有统计分析均以 $\alpha=0.05$ 为显著性水平，系统解析品种、播期及播种量对亚麻产量与品质性状的影响。

2 结果与分析

2.1 产量表现的描述性统计

对各处理产量数据的进行分析表明（表 1），

小区产量变幅为 0.098～0.260 kg/m^2，平均产量为 0.159 kg/m^2，标准差为 0.050 kg/m^2，变异系数达 31.11%，表明不同栽培处理间产量存在较大变异。每 667 m^2 产量变幅为 65.45～173.94 kg/667 m^2，平均为 106.27 kg/667 m^2。

表 1　亚麻产量描述性统计

统计指标	小区产量 /(kg·m^{-2})	每 667 m^2 产量 /(kg·667 m^{-2})
均值	0.159	106.27
标准差	0.050	33.05
最小值	0.098	65.45
最大值	0.260	173.94
变异系数/%	31.110	31.11

2.2　不同因素对产量的影响

2.2.1　品种效应

品种是影响产量的重要因素之一。由表 2 及图 1 可知，LY15 的平均小区产量与每 667 m^2 产量均最高，分别为 0.184 kg/m^2 与 122.33 kg/667 m^2，表现出优异的产量潜力。然而，其变异系数最高(33.01%)，表明稳定性稍差。LY14 的产量虽低于 LY15，但其变异系数最低(24.64%)，稳定性最佳。LY17 的产量与稳定性均居中。方差分析表明，品种间产量差异未达统计学显著水平(F=1.879 2，p=0.172 1)。

表 2　不同品种的产量表现

品种	小区产量 /(kg·m^{-2})	每 667 m^2 产量 /(kg·667 m^{-2})	标准差	变异系数 /%
LY14	0.148	98.58	0.036	24.64
LY15	0.184	122.33	0.061	33.01
LY17	0.147	97.91	0.044	30.11

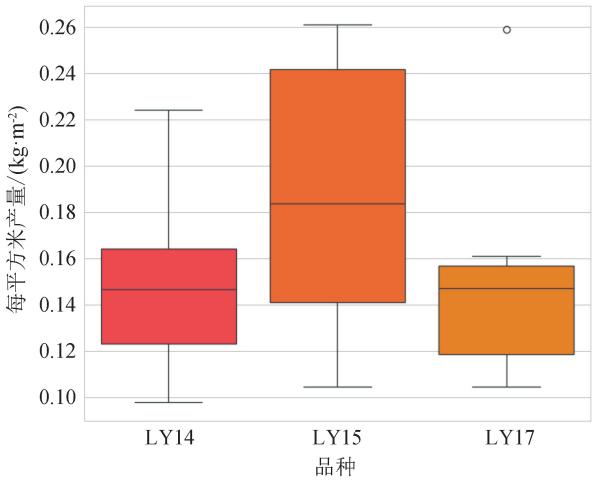


图 1　不同品种的小区产量分布箱线图

2.2.2　播期效应

播期对产量具有极显著的调控作用(p=0.017 7)。如表 3 和图 2 所示，4 月 18 日早播的平均产量(120.24 kg/667 m^2)极显著高于 5 月 8 日晚播(92.30 kg/667 m^2)，早播较晚播增产 30.27%，表明在西藏高原生态条件下适时早播对亚麻产量形成具有决定性作用。

表 3　不同播期的产量表现

播期	小区产量 /(kg·m^{-2})	每 667 m^2 产量 /(kg·667 m^{-2})	标准差	变异系数 /%
4 月 18 日	0.180	120.24	0.058	31.95
5 月 8 日	0.138	92.30	0.029	20.81

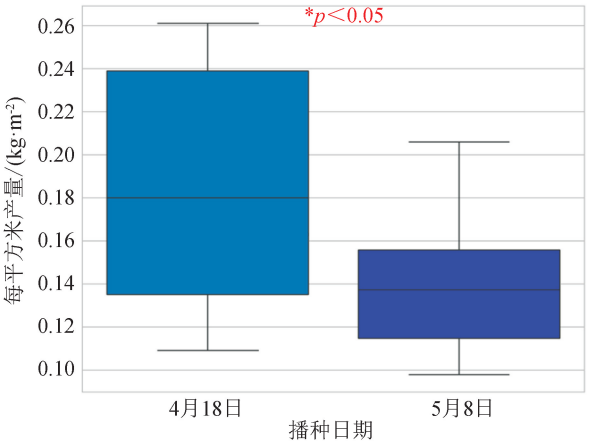


图 2　播期和产量分布箱线图

2.2.3　品种、播期互作效应

品种与播期间存在明显的交互效应(图 3)。在 4 月 18 日早播条件下，LY15 的产量优势最为突出。在 5 月 8 日晚播条件下，所有品种产量均下降，但 LY15 仍保持相对最高产量，表明其对播期变化的适应性较强。

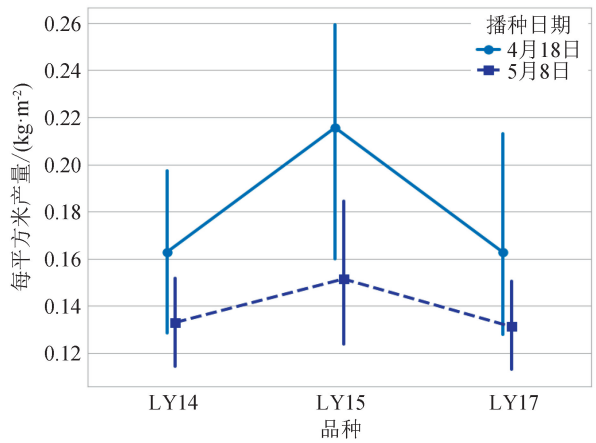


图 3　品种与播期对小区产量的交互作用

2.3　播种量的调控效应与优化

2.3.1　播种量与产量的总体关系

播种量从 800 粒/行(12.3 kg/667 m^2)增加

到2 100 粒/行(32.2 kg/667 m^2),亚麻产量表现出明显的非线性响应(表 4)。具体而言,在 800 粒/行时出现一个产量高峰,至 1 500 粒/行时降至低谷,随后在更高播种量下产量有所回升。在此总体趋势下,优势品种 LY15 在不同播种量水平下(800 粒/行除外)的产量表现均稳定优于 LY14 与 LY17(图 4)。

表 4　不同播种量的产量表现

播种量/(粒·行$^{-1}$)	折合每 667 m^2 播量/(kg·667 m^{-2})	小区产量/(kg·m^{-2})	每 667 m^2 产量/(kg·667 m^{-2})	标准差
800	12.3	0.181	120.52	0.058
1 200	18.4	0.162	108.18	0.054
1 500	23.0	0.135	89.91	0.036
1 800	27.6	0.150	100.09	0.055
2 100	32.2	0.169	112.64	0.046

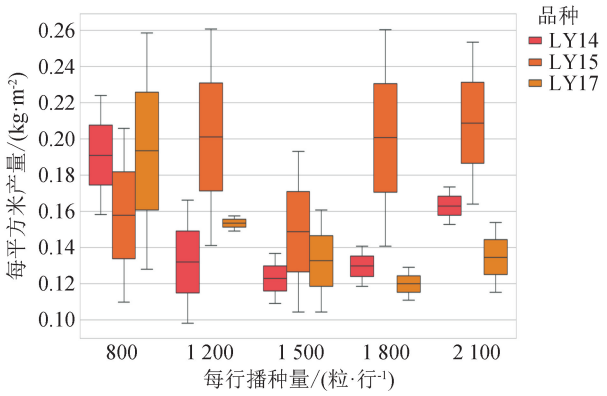


图 4　不同品种与播种量下的小区产量箱线图

2.3.2　高产模式下最优播种量的确定

不同品种、播期和播种量对亚麻产量存在显著影响(图 5):品种 LY15 平均小区产量和每 667 m^2 产量最高,虽稳定性稍差但产量潜力突出,LY14 稳定性最佳,LY17 居中;播期方面,4 月 18 日早播显著优于 5 月 8 日晚播,早播平均每 667 m^2 产量比晚播高 30.27%;播种量与产量呈先增后降的二次曲线关系(图 6)。通过二次多项式回归分析,建立了 LY15 品种在 4 月 18 日播期下产量与播种量的回归模型。模型决定系数 R^2 = 0.672,表明模型拟合良好。计算得到最优播种量为 1 831 粒/行(折合 28.1 kg/667 m^2),预测产量 0.256 kg/m^2(折合 171.2 kg/667 m^2)。回归方程为:$y=-1.23\times10^{-7}x^2+0.000\ 45x-0.155\ 6$(其中 y 为预测产量(kg/$m^2$),x 为播种量(粒/行))。

2.4　不同品种品质性状变异分析

对 3 个参试品种的品质分析表明,其性状存在显著的基因型分化(表 5)。LY17 在脂肪酸与生物碱含量上表现卓越,其 α-亚麻酸(611.88 mg/g)和总生物碱(0.51 mg/g)含量均为最高;LY15 则是蛋白质含量最高(190.6 mg/g);LY14 各性状表现均衡。各品质指标的变异程度各异,总生物碱品种间变异最大(变异系数 16.28%),表明其遗传改良潜力较高,而蛋白质含量最为稳定(变异系数 5.16%)。值得注意的是,本研究中 3 个品种的 α-亚麻酸含量变幅为 519.02～611.88 mg/g,平均 576.31 mg/g,折合百分含量为 57.63%,揭示了西藏高原环境可能对不饱和脂肪酸积累具有显著的促进作用。基于多项指标的综合评价显示,品种综合品质排序为 LY17>LY14>LY15,表明 LY17 在整体品质上具有绝对优势。

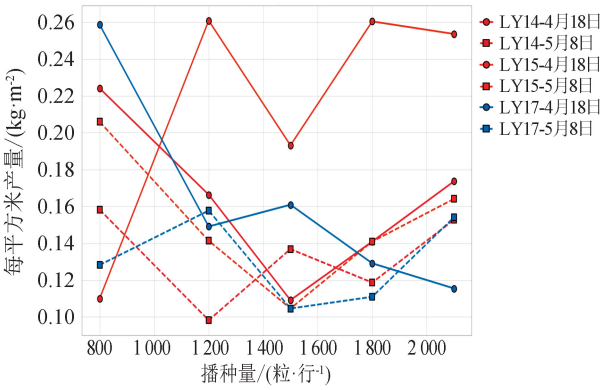


图 5　不同品种和播期下小区产量对播种量的响应

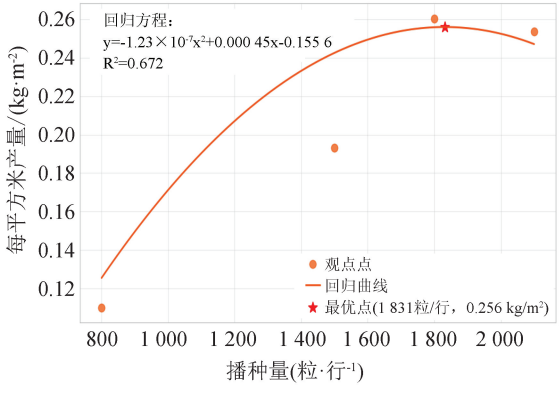


图 6　LY15 在 4 月 18 日播期下产量与播种量的回归曲线

表5　不同亚麻品种品质性状比较及变异分析

品种	亚油酸 /(mg·g^{-1})	α-亚麻酸 /(mg·g^{-1})	γ-亚麻酸 /(mg·g^{-1})	蛋白质 /(mg·g^{-1})	总生物碱 /(mg·g^{-1})
LY14	179.00	598.05	1.72	172.8	0.38
LY15	161.39	519.02	1.72	190.6	0.40
LY17	185.40	611.88	1.94	187.3	0.51
均值	175.26	576.31	1.79	183.6	0.43
标准差	12.43	50.10	0.13	0.95	0.07
变异系数/%	7.09	8.69	7.08	5.16	16.28

3　讨论与结论

3.1　讨论

本研究通过3因素随机区组设计，系统解析了品种、播期与播种量对西藏高原环境下亚麻产量的影响。结果表明，播期是主导产量形成的决定性因素，而品种与播种量的优化配置则是实现高产高效的关键因素。

3.1.1　品种稳产性的生态适应性基础

尽管本试验中品种间产量差异未达显著水平，但LY15在早、晚播期下均表现出最优且稳定的产量潜力。对于青藏高原这类“生态脆弱地区”，农业发展路径应侧重于生态可持续性而非追求绝对高产[8]。LY15的优异表现可能源于其更高效的光合系统或更强的抗氧化机制，能更好地应对西藏强烈的紫外辐射与温度波动。

3.1.2　播期调控与光温资源高效利用

本研究发现，4月18日早播的亚麻产量极显著高于5月8日晚播，增幅达30.27%，深刻揭示了作物物候与高原独特光温资源同步性的重要性。早播使亚麻关键生育期与西藏春季至夏季的最佳光温条件相吻合，从而建立了更庞大的光合营养体，为产量形成奠定了物质基础[9]，同时表明播期是引导作物生命周期最大限度利用环境资源的核心栽培措施。

3.1.3　群体结构优化

通过回归分析得出LY15在早播下的理论最优播种量为1 831粒/行，然而在实际生产中1 200粒/行已能获得相近产量，这一差异揭示了作物群体的自动调节机制[10]。研究表明，随着亚麻种植密度升高，茎秆抗折力、茎粗、茎壁厚度和木质素含量、有效结果数和单株产量逐渐降低，产量先升高后降低[11]。过高的播种量易引发群体荫蔽，增加倒伏与病害风险，导致“增种不增产”。因此，寻求经济最优而非理论最高的播种量，是农业技术推广的普遍原则。

3.1.4　高原环境对亚麻品质的调控效应

亚麻为长日照植物，研究表明亚麻产量会随着温度变高而降低，高原环境是亚麻生长的潜在分布区[12]，本研究首次系统揭示了西藏高原环境下主栽亚麻品种的品质分化特征。品质分析显示，总生物碱含量在品种间变异最大(16.28%)，表明通过遗传改良进一步提高生物碱含量的潜力较大；而蛋白质含量变异最小(5.16%)。谢亚萍等[13]检测了甘肃、青海、宁夏、山西等地的6份亚麻品种，α-亚麻酸含量为48.91%～54.35%，而引进品种在西藏拉萨试种检测α-亚麻酸含量平均为57.63%，且品种间保持8.69%的变异幅度，这为选育高不饱和脂肪酸品种提供了遗传基础。高原强烈的紫外线辐射与巨大的昼夜温差可能通过调控脂肪酸去饱和酶基因表达，促进了不饱和脂肪酸的积累[14]。

3.1.5　基于不同生产目标的栽培策略

基于本研究结果，提出相应的优化策略。高产高效模式：推荐“LY15品种、4月18日播期、1 200～1 800粒/行播种量”，该组合在试验中被证明具有高产潜力与良好的经济效益。优质专用模式：对于开发高端油用或药用产品，LY17是优选品种。为实现其产量最大化，建议同样采用4月18日早播，播种量可适当提高至1 500～2 000粒/行，以在保证卓越品质的同时，挖掘其最大产量潜力。这种根据“高产”与“优质”不同目标进行的品种分工与定向栽培，有利于形成多元化的产业格局，全面提升西藏亚麻产业的市场竞争力与经济效益。

3.2　结论

本研究系统解析了品种、播期与播种量对西

藏地区亚麻产量的调控效应，结果表明播期是决定产量的关键因素，4月18日早播极显著优于5月8日晚播，应作为高原亚麻栽培的首要调控措施；LY15在早播条件下表现出最优且稳定的产量潜力，是实现高产目标的理想选择，而LY17的不饱和脂肪酸与生物碱含量较高，是优质生产的最佳材料。综上，本研究为西藏地区亚麻高产优质栽培及产业化发展提供了关键的理论依据与技术方案，在实际推广中可根据市场导向灵活选择适宜模式，以推动西藏地区亚麻产业的多元化发展。

参考文献：

[1] 李丹.青藏高原灌溉农业生态环境演变特征及效应研究[D].武汉：武汉大学，2022.

[2] 潘开文，王学经，唐亚伟，等.青藏高原农田生态系统与粮食安全科学考察研究专题进展(二)[J].应用与环境生物学报，2024，30(6)：1055-1063.

[3] 孙夏玲，叶春雷，王炜，等.甘肃中部寒旱区胡麻旧膜免耕穴播技术[J].寒旱农业科学，2025，4(9)：847-850.

[4] 严斧.作物光温生态[M].北京：中国农业科学技术出版社，2009.

[5] 韩天富，张卫建，胡国华，等.隐性自然灾害对中国作物生产的影响及其应对策略[J].农学学报，2013，3(2)：44-49.

[6] 何世炜，常生华，武得礼，等.大豆播种密度对籽实产量及其构成因素影响的研究[J].草业学报，2005，14(5)：43-47.

[7] 钟林光，王朝晖.播期和种植密度对油菜品种湘杂油7号产量及品质的影响[J].广西农业科学，2010，41(6)：536-538.

[8] 李立军，褚庆全，胡志全，等.我国主要粮食作物区域布局变化研究[J].农业现代化研究，2004，25(5)：334-339.

[9] 刘建新.黄土高原旱作胡麻丰产栽培技术[J].中国种业，2003(3)：35-36.

[10] 刘永安，邹静，陈志国.青海胡麻新品种选引及适宜播量试验初报[J].干旱地区农业研究，2008，26(3)：90-94.

[11] 杨治伟，钱爱萍，张炜，等.种植密度对胡麻抗倒性和产量的影响[J].中国农学通报，2024，40(8)：1-5.

[12] 姚玉璧，邓振镛，王润元，等.气候变化对甘肃胡麻生产的影响[J].中国油料作物学报，2006，28(1)：49-54.

[13] 谢亚萍，张建平，王利民，等.亚麻籽油营养特性、感官评价及主要挥发性物质分析[J].中国油脂，2023，48(7)：103-108.

[14] 刘蕊，王宁宁，王玉康，等.油菜种子含油量影响因素及调控综述[J].江苏农业科学，2019，47(12)：25-29.