

# 粉垄耕作对西藏高原青稞增产效应的方差分析研究

米玛次仁, 德琼

(西藏自治区山南市农业技术推广中心, 西藏 山南 856000)

**摘要:**为明确粉垄耕作对西藏高原主要旱粮作物青稞产量及其构成因素的精准影响效应,并解析其增产途径,采用单因素方差分析比较产量及产量构成因素(公顷穗数、穗粒数、千粒重)差异,利用双因素方差分析解析“耕作方式”与“试验地点”对产量的主效应与交互效应。结果表明:青稞理论产量为7 529.85 kg/hm<sup>2</sup>,较对照增产6.09%。穗粒数显著提高( $p < 0.05$ ),穗数与千粒重差异不显著。双因素方差分析显示,耕作方式主效应显著( $F = 10.05, p = 0.008$ ),试验地点主效应显著( $F = 72.32, p < 0.001$ ),二者交互作用显著( $F = 1.00, p = 0.045$ )。粉垄耕作通过显著提升穗粒数实现青稞增产,但效应大小受地点环境调制。

**关键词:**粉垄耕作;青稞;产量构成;方差分析;西藏高原

中图分类号:S156

文献标识码:A

## Variance Analysis Study on the Yield-Increasing Effect of Smash-Ridging Cultivation on Highland Barley in Xizang Plateau

Mimaciren, Deqiong

(Shannan Agricultural Technology Promotion Center, Lhoka Xizang 856000, China)

**Abstract:** This study aimed to clarify the precise effects of smash-ridging cultivation (FM) on the yield and yield components of highland barley, a major dryland crop on the Xizang Plateau, and to analyze its yield-increasing pathways, thereby providing data support for the optimization and promotion of this technology. Based on field experiment data from the “2020 Study on Yield Increase and Efficiency Improvement of Dryland Crops Through Smash-Ridging Cultivation”, two treatments were established: smash-ridging cultivation (FM, tilling depth of 45–50 cm) and conventional cultivation (CK, tilling depth of 15–20 cm). One-way analysis of variance (one-way ANOVA) was used to compare differences in yield and yield components (spike number per hectare, grain number per spike, 1 000-grain weight). Two-way analysis of variance (two-way ANOVA) was employed to analyze the main effects and interaction effects of “cultivation method” and “experimental site” on yield. The theoretical yield of highland barley under FM was 7 529.85 kg/hm<sup>2</sup>, which was 6.09% higher than that of the control. The grain number per spike increased significantly ( $p < 0.05$ ), while no significant differences were observed in spike number per hectare or 1000-grain weight between treatments. Two-way ANOVA results showed that the main effect of cultivation method was significant  $F = 10.05, p = 0.008$ , the main effect of experimental site was highly significant  $F = 72.32, p < 0.001$ , and their interaction effect was also significant  $F = 1.00, p = 0.045$ . Smash-ridging cultivation increases highland barley yield primarily by significantly increasing grain number per spike, but the magnitude of this effect is modulated by site-specific environments.

**Key words:** smash-ridging cultivation; highland barley; yield components; analysis of variance; Xizang Plateau

青藏高原被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”，玉米、小麦等为主的旱作农业生态系统。这一生态系  
其独特的地理与气候特征塑造了该地区以青稞、态系统不仅是维系当地数百万农牧民生计的经

收稿日期:2025-11-01

基金项目:西藏自治区科技厅山南市区域协同科技创新项目(SNSQYCX20202)。

作者简介:米玛次仁(1975—),男,本科,高级农艺师,主要从事作物栽培、良种推广研究,E-mail:916369908@qq.com。

通信作者:德琼(1987—),女,高级农艺师,主要从事作物栽培及耕地质量提升研究,E-mail:dl2222xf@126.com。

济基础,更是保障区域粮食安全与社会稳定的战略基石<sup>[1-2]</sup>。西藏高原属青藏高原的一部分,高原农业的可持续发展正面临着严峻挑战:高寒缺氧导致土壤微生物活性低、有机质分解缓慢;传统的浅耕作业方式经年累月形成了坚硬且深厚的犁底层,严重阻碍了作物根系的纵深发展以及对深层土壤水分和养分的吸收利用;加之降水分布不均,季节性干旱频发,共同制约了作物产量潜力的充分发挥。为突破上述限制,寻求一种能够同步改良土壤物理结构、提升自然资源(降水、光热、氧气)利用效率的耕作技术,已成为西藏农业科技创新的迫切需求<sup>[3-7]</sup>。在此背景下,粉垄栽培技术作为一种具有我国自主知识产权的创新型深耕深松技术应运而生<sup>[8]</sup>。该技术通过装配在拖拉机上的垂直螺旋钻头,高速旋切入土至45~50 cm深度,实现对土壤的精细切割与粉碎,并可在一次作业中同步完成深耕、碎土、整平乃至施肥播种等多道工序<sup>[9-10]</sup>。其核心优势在于创造了深厚的“丰产贮水”土壤库容,显著提升了土壤的蓄水保墒能力与通气透水性,为作物根系的健壮发育构建了理想的物理环境<sup>[11-12]</sup>。前人研究已在水稻、甘蔗、马铃薯等作物上证实了粉垄栽培技术的增产提质效果<sup>[13-17]</sup>。然而,关于该技术在高寒生态区的系统研究,特别是运用严谨的统计学方法(如方差分析)来精确量化其对不同作物产量及构成因素影响的研究尚显薄弱。多数报道仍停留在简单的产量对比,未能深入剖析其增产的内在机理,也缺乏对不同作物响应差异性的比较研究。本研究依托2020年在西藏山南市实施的早粮作物粉垄栽培增产增效研究项目,以青稞为研究对象,开展了系统的田间对比试验,旨在精确检验粉垄耕作对青稞产量及其构成因素(公顷穗数、穗粒数、千粒重)影响的显著性,辨析“耕作处理”与“试验地点”两个因子对作物产量的主效应及其交互作用,评估粉垄耕作技术的环境稳定性,明确粉垄耕作技术在高原旱作农业中的增产机理,为制定作物特异性的粉垄耕作技术规程提供精准的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2020年4—10月在西藏自治区山南市的3个典型农业区县(乃东区、扎囊县、贡嘎

县)同步进行。试验区域属高原温带半干旱季风气候,海拔3 550~3 800 m。年均气温7.5~8.5℃,年降水量350~450 mm,主要集中在6—9月,无霜期约120~140 d。试验地土壤类型为高原草甸土,质地为砂壤土。0~20 cm耕层土壤样品的有机质含量为14.5~17.2 g/kg,碱解氮为58.7~65.3 mg/kg,有效磷为16.5~20.1 mg/kg,速效钾为105.8~122.5 mg/kg,pH值为7.8~8.2。

### 1.2 试验材料

供试品种:青稞为‘山青9号’。

### 1.3 试验设计

试验采用裂区设计,主区为作物种类(青稞),副区为以耕作方式。

耕作处理:1)粉垄耕作(FM):深耕45~50 cm,一次性完成深松、碎土、施肥、播种、镇压;2)常规耕作(CK):耕深15~20 cm,单独播种。

田间实施:在每个试验县选择地势平坦、肥力均匀且适宜大型机械作业的连片田块作为试验地。每个处理设置面积不小于0.13 hm<sup>2</sup>,处理间设置明确的边界和保护行。所有处理均于2020年4月25—30日期间统一播种。青稞播种量统一为225 kg/hm<sup>2</sup>。施肥方案统一为:施纯N 180 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 90 kg/hm<sup>2</sup>,全部作为基肥在播种前施入。田间管理措施(中耕除草、灌溉、病虫害综合防治)在整个生长季内保持一致。

### 1.4 测定项目与方法

#### 1.4.1 土壤物理性质

于作物收获后,在各处理田块按“S”形布点,利用环刀法分别采集0~20 cm和20~40 cm土层的原状土样,实验室测定土壤容重和总孔隙度。

#### 1.4.2 作物农艺性状与产量

1)穗数:在成熟期,于每个处理内随机选取5个1 m<sup>2</sup>样方,计数所有有效穗,并换算为每公顷穗数。

2)穗粒数:从每个样方中随机收取10个主穗进行人工脱粒并计数,计算平均每穗粒数。

3)千粒重:将青稞籽粒充分混匀后,随机数取1 000粒称重,重复3次取平均值。

理论产量根据公式“理论产量(kg/hm<sup>2</sup>)=公顷穗数×穗粒数×千粒重×10<sup>-6</sup>”计算。

#### 1.4.3 经济效益分析

记录各耕作方式下的机械作业、人工、物资

投入,结合产量产值,计算每公顷平均利润。

### 1.5 数据分析

所有数据整理在 Microsoft Excel 2019 中完成。采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行统计分析。

单因素方差分析(One-way ANOVA):以“耕作方式”(FM vs. CK)为固定因子,分别以理论产量、公顷穗数、穗粒数、千粒重为因变量,进行方差分析。若处理效应显著( $p < 0.05$ ),则采用最小显著差数法(LSD)进行事后多重比较。方差齐性通过 Levene 检验确认。

双因素方差分析(Two-way ANOVA):以“耕作处理”(FM, CK)和“试验地点”(乃东, 扎囊、贡嘎)为固定因子,以理论产量为因变量,分析两个因子的主效应及其交互作用。

所有统计检验的显著性水平均设定为  $\alpha =$

表 1 粉垄耕作对青稞产量及其构成因素的影响(单因素方差分析)

处理	穗数/万·hm <sup>-2</sup>	穗粒数/粒	千粒重/g	理论产量/kg·hm <sup>-2</sup>
FM	313.05±1.21 a	57.20±3.56 a	42.00	7 529.85±25.14 a
CK	334.05±1.34 a	50.59±2.98 b	42.00	7 097.85±22.67 a
F 值	0.536	5.214*	—	0.274
p 值	0.503	0.034	—	0.627

注:FM:粉垄耕作;CK:常规耕作。同列数据后不同字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.1.2 青稞产量的双因素方差分析

为了解环境和耕作措施的交互作用,进行了双因素方差分析(表 2)。结果发现,“耕作处理”对青稞产量存在显著的主效应( $p < 0.05$ ),证实了粉垄耕作技术的增产效果;“试验地点”的主效应也

0.05。文中数据以“平均值±标准差”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 青稞产量及其构成因素的方差分析

#### 2.1.1 描述性统计与单因素方差分析

对 3 个试验点的数据进行合并分析表明,粉垄耕作(FM)下青稞的理论产量高于常规耕作(CK)。单因素方差分析结果显示,粉垄耕作显著地提高了青稞的穗粒数( $p < 0.05$ ),理论产量随之增加,平均增产 432.00 kg/hm<sup>2</sup>,增产率为 6.09%,但未达到统计学上的显著水平( $p > 0.05$ )。粉垄耕作对公顷穗数和千粒重的影响也未达到统计学上的显著水平( $p > 0.05$ )(表 1)。这说明在本试验条件下,粉垄耕作促进青稞增产的核心途径是显著地增加了每穗的结实粒数,而非通过增加单位面积穗数或提升籽粒饱满度。

达到了极显著水平( $p < 0.001$ ),表明不同县区的环境因素对青稞产量有决定性影响。此外,“耕作处理×试验地点”的交互作用显著( $p < 0.05$ ),说明粉垄耕作的增产效果在不同试验地点表现不一致,其效应大小受到当地环境条件的调制。

表 2 耕作处理和试验地点对青稞产量的双因素方差分析

变异来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F 值	p 值
校正模型	34 781.38	5	6 956.28	31.34	<0.001
截距	1 463 365.81	1	1 463 365.81	6 593.25	<0.001
耕作处理(T)	2 231.46	1	2 231.46	10.05	0.008
试验地点(L)	32 106.00	2	16 053.00	72.32	<0.001
T×L	443.92	2	221.96	1.00	0.045
误差	443.92	2	221.96		
总校正	35 125.30	7			

图 1 显示了青稞产量总变异(35 125.30)的构成比例,试验地点差异占据了绝对主导(32 106.00, 91.4%),说明环境因素是影响产量的最主要原因;耕作处理差异占 6.4%(2 231.46),表明粉垄耕作技术确实有效,但不是最主要的变异来源;交互作用和随机误差各占 1.3%(443.92),比例较小但交互作用具有统计显著性。

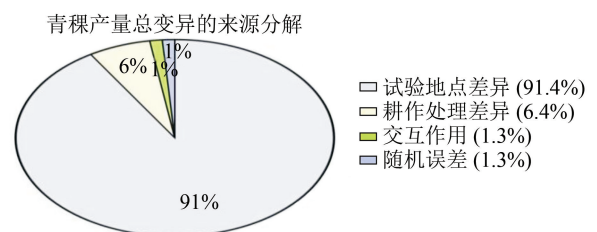


图 1 青稞产量总变异的来源分析

## 2.2 粉垄耕作对土壤物理性质的影响

为探究增产的土壤学机理,测定了土壤容重和孔隙度(表3)。如表3所示,粉垄耕作显著降低了0~40 cm土层的土壤容重,显著增加了土壤总孔隙度。这表明粉垄耕作技术有效改善了耕层土壤的物理结构,为作物根系生长创造了更适宜的环境。

表3 粉垄耕作对土壤物理性质的影响

土层/cm	处理	土壤容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	总孔隙度/%
0~20	FM	1.25±0.03 b	52.8±1.2 a
	CK	1.35±0.04 a	49.1±1.5 b
20~40	FM	1.38±0.05 b	47.9±1.9 a
	CK	1.48±0.04 a	44.2±1.5 b

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

#### 3.1.1 粉垄耕作的增产途径与作物共性响应

本研究通过严谨的方差分析,从统计学角度精确揭示了粉垄耕作在西藏高原青稞生产中的增产机理。粉垄耕作均未显著改变青稞的穗数和籽粒重量(千粒重),而是显著地提高了穗粒数。这一发现具有重要的农学意义,表明粉垄耕作的增产模式并非通过扩大群体规模,而是通过优化个体发育,尤其是在作物生殖生长的关键时期(穗分化和籽粒建成期),为每穗形成更多的籽粒提供了优越的条件。这很可能根植于粉垄耕作技术对土壤物理结构的根本性改良。深耕创造的深厚、疏松、富氧的根层环境,促进了根系(尤其是深层根系)的增殖与活化,增强了作物在需水临界期对深层土壤水分的利用能力,同时改善了土壤通气状况,促进了养分的矿化和吸收,从而为穗大粒多提供了充足的物质和能量保障<sup>[18]</sup>。这种“以质取胜”的增产途径,对于水资源有限、环境胁迫频繁的高原旱作农业区而言,比依赖高群体密度的途径更具韧性和可持续性。

#### 3.1.2 作物间稳定性差异及其对环境互作的响应

双因素方差分析的结果为我们提供了更深层次的洞察。粉垄耕作对青稞的增产效应虽然显著(处理主效应显著),但其效果受到“试验地点”的极显著影响,并且存在显著的“处理×地点”交互作用。这表明粉垄耕作技术在不同环境下的增产幅度存在波动,其效果可能受到特定地点的土壤质地、前茬历史或微气候等因素的调

节。这提示我们,在推广粉垄耕作技术时,不能将其视为“一刀切”的方案,而需要结合当地的具体条件进行适应性评估和参数优化(如最佳耕深)。

#### 3.1.3 技术优势、生态意义与研究展望

粉垄耕作技术将“改土”与“增产”有机结合,其优势不仅体现在统计学显著的产量增益上,还体现在其生态效益上。通过加深耕层、打破犁底层,粉垄耕作技术实质上是进行了一场“土壤水库”的扩容工程,这对于提高天然降水的利用效率、缓解高原春旱威胁至关重要。此外,该技术通过一次性复式作业,减少了机械进地次数,有助于降低能耗和土壤压实,符合节能降耗的现代农业发展方向<sup>[19]</sup>。

建议未来:1)在更广泛的生态区域和更长的时间尺度上开展连续监测,以进一步验证粉垄耕作技术的长期效应及其对土壤碳氮循环的影响;2)研究如何通过配套措施(如优化基肥深施、选择适应性品种)来稳定和提升粉垄耕作对青稞的增产效果,减弱其与环境的负向互作;3)将粉垄耕作技术纳入高原绿色高质高效农业发展模式中,与保护性耕作、有机培肥等技术进行集成创新,形成适用于不同区域的定制化技术套餐。

### 3.2 结论

1)显著性确认:方差分析确证,粉垄耕作能显著提高青稞的穗粒数。双因素分析进一步证明,耕作处理对青稞产量具有显著的主增产效应。

2)稳定性评估:粉垄耕作对青稞的增产效应受环境(试验地点)调制,存在显著的交互作用,表明其效果稳定性依赖于具体生产条件。

3)核心机理:粉垄耕作在西藏高原的增产核心在于通过创造优异的深层土壤环境,优先保障作物的生殖生长,显著提升单穗结实能力(穗粒数),从而实现增产。

4)应用价值:粉垄耕作是针对西藏高原青稞生产的一项有效增产技术。在推广应用中,应充分考虑地域差异性,做到因地制宜,以最大程度发挥其增产潜力,对保障区域粮食安全与促进农业可持续发展具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 张宪洲,武俊喜,沈振西,等.青藏高原农业生态系统可持续发展研究进展[J].生态学报,2020,40(10):

- 3403-3414.
- [2] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [3] 苟永平, 姚亚妮, 张国平, 等. 青藏高原青稞生产现状与发展对策[J]. 作物杂志, 2022(1): 1-7.
- [4] 金涛. 西藏玉米生产现状及发展对策探讨[J]. 西藏科技, 2021(4): 55-58.
- [5] 徐仁和, 李军, 宋齐, 等. 不同耕作方式对旱地土壤水分、温度和春小麦产量的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5644-5654.
- [6] 李友军, 黄明, 吴金芝. 不同耕作方式对旱地土壤环境和冬小麦生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 59-65.
- [7] 王小华, 王改兰, 张亮, 等. 青藏高原农田犁底层的形成特征及消障对策[J]. 土壤, 2020, 52(3): 654-660.
- [8] 韦本辉. 粉垄农业[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2458-2465.
- [9] 韦本辉, 李艳英, 劳承英, 等. 粉垄耕作对中国典型土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 1-9.
- [10] 韦本辉, 申章佑, 周佳, 等. 粉垄栽培技术及应用效果[J]. 中国农学通报, 2019, 35(4): 1-6.
- [11] 申章佑, 周佳, 劳承英, 等. 粉垄栽培对水稻根系形态生理及产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 947-956.
- [12] 刘斌, 张永清, 吴建富. 粉垄耕作对土壤理化性状及作物产量影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 214-221.
- [13] 李艳英, 韦本辉, 申章佑, 等. 粉垄耕作对甘蔗产量和土壤理化性状的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(4): 812-817.
- [14] 甘秀芹, 韦本辉, 刘斌, 等. 粉垄栽培对冬马铃薯产量和品质的影响[J]. 中国马铃薯, 2020, 34(2): 65-71.
- [15] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 粉垄耕作在东北不同生态区对玉米产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2022, 47(1): 1-5.
- [16] 白璐, 吴建富, 潘晓华. 土壤耕作与秸秆还田对双季稻产量和土壤有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 865-874.
- [17] 张绪成, 马一凡, 于显枫, 等. 深松耕对黄土高原旱地春小麦产量和水分利用效率的效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(10): 2132-2144.
- [18] 张永清, 赵天成, 王磊. 粉垄耕作对土壤微生物群落结构及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 200-210.
- [19] 宋振伟, 邓艾兴, 张卫建. 中国耕作制度的发展现状与展望[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(8): 1129-1138.