

拉萨农田土壤基础地力特征 及其对青稞高产稳产的影响研究

陈初红,袁成立,索朗旦增,索朗多吉,何玉婷,
康珍,米久次珍,扎西群措,高磊,尼玛卓拉

(西藏自治区拉萨市农业技术研究推广站,西藏拉萨 850000)

摘要:基于2008—2024年西藏自治区拉萨市91个青稞“3414”田间试验数据,分析农田土壤基础地力特征及其对青稞产量的影响。结果表明:拉萨市青稞土壤基础地力平均产量为2 596.35 kg/hm²,地力贡献率平均为53.66%,显著高于青藏区(40.4%)和甘新区(38.7%),说明耕地基础地力是青稞产量形成的核心驱动力,且与土壤贡献率呈显著正相关,与肥料贡献率呈显著负相关。氮、磷、钾养分的土壤贡献率与基础地力产量呈对数相关,其中氮素相关性最强。中低地力水平(<3 000.00 kg/hm²)下单位化肥增产量高于高地力水平,氮肥对青稞增产作用最为显著(增产率55.69%),而磷、钾肥效应相对较低。产量可持续性指数(SI)和稳定性指数(YSD)分析显示,中等地力水平(2 250.00~3 000.00 kg/hm²)SI最高(0.95),YSD最低(0.05),是平衡产量与生态可持续性的关键管理区间;高地力水平(≥3 750.00 kg/hm²)虽施肥增产量最高(3 150.00 kg/hm²),但需关注过度施肥导致的可持续性下降问题。因此,低产田应强化氮肥投入,高产田需控氮增施有机肥,中等地力田块需注重养分投入与生态保护协同,为高寒区耕地质量提升和化肥减量增效提供新范式。

关键词:青稞;土壤基础地力;土壤贡献率;肥料贡献率;产量可持续性;产量稳定性;西藏拉萨

中图分类号:S512.3

文献标识码:A

Research on the Basic Soil Fertility Characteristics of Farmlands in Lhasa and Its Effects on the High and Stable Yield of Highland Barley

CHEN Chuhong, YUAN Chengli, Suolangdanzeng, Suolangduoji,

HE Yuting, KANG Zhen, Mijiucizhen, Zhaxiquncuo, GAO Lei, Nimazuola

(Lhasa Agriculture Technology Research Extension Stations, Lhasa Xizang 850000, China)

Abstract: This study analyzed the characteristics of farmland basic soil fertility and its impact on highland barley yield based on data from 91 “3414” field experiments conducted in Lhasa City from 2008 to 2024, aiming to provide theoretical support for improving cultivated land quality and precision fertilization in cold plateau regions. The results show that the average basic soil fertility yield of highland barley in Lhasa is 2 596.35 kg/hm², with an average soil fertility contribution rate of 53.66%—significantly higher than those in the Qinghai-Xizang (40.4%) and Gansu-Xinjiang (38.7%) regions. This indicates that cultivated land basic soil fertility is the core driving force behind highland barley yield formation, exhibiting a significant positive correlation with soil contribution rate and a significant negative correlation with fertilizer contribution rate. The soil contribution rates of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) nutrients exhibit logarithmic relationships with basic soil fertility yield, with N showing the strongest correlation. Under medium-low soil fertility levels (<3 000.00 kg/hm²), the per-unit chemical fertilizer yield increase is higher than that under high soil fertility levels. Nitrogen (N) fertilizer exerts the most significant yield-increasing effect on highland barley (yield increase rate: 55.69%), whereas phosphorus (P) and potassium (K) fertilizers show relatively low effects. Analysis of the yield sustainability index (SI) and yield stability index (YSD) reveals that under medium soil fertility levels (2 250.00—

收稿日期:2025-04-14

基金项目:拉萨市重点科技计划项目——拉萨农田土壤基础地力与养分利用效率协同提升技术研究(LSKJ202422)。

作者简介:陈初红(1979—),男,正高级农艺师,主要从事土壤肥料与作物栽培等工作,E-mail:wsrf921@163.com。

3 000.00 kg/hm²), SI is the highest (0.95) and YSI the lowest (0.05), representing the key management interval for balancing yield and ecological sustainability. Although the fertilization-induced yield increase is the highest 3 150.00 kg/hm² under high soil fertility levels ($\geq 3 750.00$ kg/hm²), attention is warranted to the reduced sustainability caused by excessive fertilization. The study suggests that for low-yield fields, nitrogen (N) fertilizer input should be enhanced; for high-yield fields, N input should be controlled while increasing organic fertilizer application; and for medium-fertility fields, emphasis should be placed on coordinating nutrient input and ecological protection. This provides a new paradigm for improving cultivated land quality and enhancing chemical fertilizer reduction and efficiency in alpine regions.

Key words: highland barley; soil basic productivity; soil contribution rate; fertilizer contribution rate; yield sustainability; yield stability; Lhasa Xizang

农田土壤基础地力是指在没有人有施肥、灌溉、耕作等管理措施影响下,土壤本身所具有的为作物生长提供养分、水分、空气和适宜环境条件的能力,它是土壤的一种固有属性,是作物高产稳产的核心保障,其强弱直接影响养分利用效率,是衡量土壤肥力的综合指标,反映农田肥力和生产力^[1]。拉萨市地处青藏高原,气候高寒,土壤发育程度低,基础地力普遍薄弱^[2]。拉萨市第三轮耕地土壤养分检测结果显示,全市耕地土壤 pH 值变幅为 4.20~9.20,平均为 7.66,有机质含量为 1.80~70.70 g/kg,平均含量为 23.00 g/kg,全氮变幅为 0.14~4.56 g/kg,平均含量为 1.33 g/kg,有效磷含量的变幅为 0.90~282.00 mg/kg,平均含量为 13.86 mg/kg,而速效钾含量的变幅为 25.80~909.80 mg/kg,平均含量为 101.98 mg/kg。研究表明,拉萨市耕地质量等级以 7~10 等为主(占比 97.83%),土壤保水保肥能力差,微生物活性弱^[3]。如何通过科学管理提升地力,成为当地农业可持续发展的关键。本研究通过解析土壤基础地力与青稞产量的互作机制,结合测土配方施肥技术,优化氮、磷、钾配比,以期高原冷凉区精准施肥提供理论支撑,对推动化肥减量增效、为高寒区耕地质量提升提供新范式。

1 材料与方法

1.1 试验设计

利用 2008—2024 年在拉萨市布置的 91 个青稞“3414”试验进行研究,覆盖拉萨市 6 个农业县(区)。“3414”是测土配方施肥中一种常用的肥料效应田间试验方案。具体含义如下:3:指氮、磷、钾 3 个因素;4:指 0、1、2、3 共 4 个水平。其中,0 水平指不施肥,2 水平指推荐最佳施肥量,1 水平是 2 水平的一半,为不足施肥水平,3

水平是 2 水平的 1.5 倍,为过量施肥水平;14:指 14 个处理,分别为:①缺肥区 4 个:处理 1-N₀P₀K₀、处理 2-N₀P₂K₂、处理 4-N₂P₀K₂、处理 8-N₂P₂K₀;②过量施肥区 3 个:处理 7-N₂P₃K₂、处理 10-N₂P₂K₃、处理 11-N₃P₂K₂;③最佳施肥区 1 个:处理 6-N₂P₂K;④施肥不足区 6 个:处理 3-N₁P₂K₂、处理 5-N₂P₁K₂、处理 9-N₂P₂K₁、处理 12-N₁P₁K₂、处理 13-N₁P₂K₁、处理 14-N₂P₁K₁。通过这 14 个处理,可以研究氮、磷、钾不同施肥水平及其组合对作物生长、产量的影响。本研究选择“3414”中的 5 个处理:处理 1-无肥区(CK)、处理 2-缺氮区(PK)、处理 4-缺磷区(NK)、处理 8-缺钾区(NP)、处理 6-全肥区(氮、磷、钾按 2 水平施肥,NPK)进行研究,试验设 3 次重复,小区面积 20 m²,采用随机区组设计,2 水平推荐施肥量为 N:94.20~221.85 kg/hm²,平均为 129.15 kg/hm²,肥料品种为单质肥尿素;P₂O₅:18.00~65.55 kg/hm²,平均为 50.55 kg/hm²,肥料品种为单质肥过磷酸钙;K₂O:22.50~144.00 kg/hm²,平均为 46.20 kg/hm²,肥料品种为单质肥氯化钾。

1.2 田间试验样品采集与测定

在成熟期,小区内按照蛇形法取 3 个 1 m² 青稞全植株样的地上部分(包括茎秆、叶片、穗部及籽粒),剔除混入的残枝杂草等非青稞植株物质,带回室内将每个样方的植株穗部进行单独脱粒,确保籽粒脱离穗轴,避免遗漏,脱粒后的籽粒过 20 目筛去除瘪粒、碎壳等杂质,为保证籽粒干重测定的准确性,将清选后的籽粒置于烘箱中,在 105 °C 条件下持续杀青处理 30 min,再调至 80 °C 烘干至恒重(两次称量差值 ≤ 0.5 g);用天平(精度 0.01 g)称量籽粒干重,即为该样方的青稞籽粒产量。

1.3 参数介绍及计算方法

衡量土壤基础地力一般借助在零肥料投入

状态下的作物产量作为评价指标。为深入剖析青稞产量对土壤本底肥力及肥料效应的依赖情况,进一步对土壤基础地力贡献率和肥料增产率展开计算。

土壤基础地力贡献率一般用 C (Contribution of nutrient supply to yield) 表示,是指在不施用任何外源肥料(如化肥、有机肥)的情况下,土壤自身所提供的养分对作物产量的贡献比例。它反映了土壤自然肥力(基础地力)对作物生长的支撑能力,是评价土壤质量和制定施肥策略的重要指标。土壤基础地力贡献率越高,越容易获得较高的基础地力产量。具体计算公式为:

$$\text{土壤基础地力贡献率}(\%) = (\text{无肥区作物产量 } Y_{\text{CK}} / \text{全肥区作物产量 } Y_{\text{NPK}}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{土壤氮贡献率}(\%) = (\text{无氮区作物产量 } Y_{\text{PK}} / \text{全肥区作物产量 } Y_{\text{NPK}}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{土壤磷贡献率}(\%) = (\text{无磷区作物产量 } Y_{\text{NK}} / \text{全肥区作物产量 } Y_{\text{NPK}}) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{土壤钾贡献率}(\%) = (\text{无钾区作物产量 } Y_{\text{NP}} / \text{全肥区作物产量 } Y_{\text{NPK}}) \times 100 \quad (4)$$

肥料增产率是指施用肥料后,作物产量相对于不施肥(无肥区)的增长比例,反映肥料对作物增产的直接贡献,一般用 I (increment rate by fertilizer) 表示,具体计算公式为:

$$\text{肥料增产率}(\%) = (\text{全肥区产量 } Y_{\text{NPK}} - \text{无肥区产量 } Y_{\text{CK}}) / \text{无肥区产量 } Y_{\text{CK}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{氮肥料增产率}(\%) = (\text{全肥区产量 } Y_{\text{NPK}} - \text{无氮区产量 } Y_{\text{PK}}) / \text{无氮区产量 } Y_{\text{PK}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{磷肥料增产率}(\%) = (\text{全肥区产量 } Y_{\text{NPK}} - \text{无磷区产量 } Y_{\text{NK}}) / \text{无磷区产量 } Y_{\text{NK}} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{钾肥料增产率}(\%) = (\text{全肥区产量 } Y_{\text{NPK}} - \text{无钾区产量 } Y_{\text{NP}}) / \text{无钾区产量 } Y_{\text{NP}} \times 100 \quad (8)$$

作物产量的可持续性指数 SI (Sustainability Index) 是衡量作物产量在长期内保持稳定且具有可持续性的综合指标,是作为发现当前农业生产方式存在的问题和薄弱环节,从而有针对性地采取改进措施的一个重要参数,SI 数值越大,产量的可持续性越好^[4]。具体计算公式为:

$$SI = (Y_{\text{NPK}} - \sigma) / Y_{\text{NPK-max}} \times 100 \quad (9)$$

式中: Y_{NPK} 为试验中 2 水平处理的平均产量, $Y_{\text{NPK-max}}$ 为试验中 2 水平处理的最高产量, σ 为标准差。

产量稳定性指数 YSI (Yield Stability Index) 用于量作物产量的稳定水平,是制定种植计划和管理措施的重要参考依据,YSI 数值越低,意味着作物产量在不同生长周期或年份间的波动幅度越小,产量表现更为稳定。具体计算公式为:

$$YSI = \text{STD}(Y_{\text{NPK}}) / Y_{\text{NPK}} \times 100 \quad (10)$$

式中: Y_{NPK} 为试验中 2 水平处理的平均产量,STD(Y_{NPK}) 为 2 水平处理产量的标准差^[4-6]。

为探究青稞产量对土壤基础地力的反应机制,借助平均单产法,以不施肥对照产量为依据,把 91 个青稞试验的土壤基础地力产量细分为 5 个等级,即 $< 1\ 500$ 、 $1\ 500 \sim 2\ 250$ 、 $2\ 250 \sim 3\ 000$ 、 $3\ 000 \sim 3\ 750$ 和 $> 3\ 750$ kg/hm²。旨在通过这种土壤基础地力分级方式,对比分析不同肥力条件下地块的肥料作用效果、产量可持续性表现和稳定性状况。

1.4 数据统计分析

运用 WPS 2024 和 Microsoft Excel 2021 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 基础地力产量与土壤和肥料贡献率的关系

由表 1 可知,拉萨市农田土壤基础地力产量平均值为 2 596.35 kg/hm²,在施加肥料后,产量平均值跃升至 4 931.40 kg/hm²,施肥带来的平均增产效果达 2 335.05 kg/hm²,且呈现出土壤基础地力越高的地块,施肥后的增产幅度越大的明显趋势。在产量贡献比例层面,拉萨市农田土壤基础地力贡献率在 36.50%~66.91% 之间浮动,均值为 53.66%,最高值与最低值间的差距高达 30.41%;肥料贡献率则介于 37.01%~63.50%,均值为 46.34%。数据分布特征表明,肥料投入在拉萨市青稞产量构成中占据着重要地位,青稞产量对肥料存在较高的依赖程度。借助图 1 的可视化数据分析,二者关系更加明晰:拉萨市农田土壤基础地力产量与土壤相对贡献率呈现显著的正相关态势,即随着土壤基础地力水平的提升,土壤自身养分对青稞产量的贡献占比也随之增大;而基础地力产量与肥料相对贡献率则呈现显著的负相关关系,即土壤基础地力越低,肥料投入在提升青稞产量过程中所发挥的作用就愈明显。

表 1 拉萨市农田土壤基础地力产量、施肥产量、施肥增产量及地力和肥料贡献率

土壤基础地力 产量分级	产量/kg·hm ⁻²			贡献率/%	
	基础地力产量	施肥产量	施肥增产量	地力贡献率	肥料贡献率
	均值±SD(CV)[sig]	均值±SD(CV)[sig]	均值±SD(CV)[sig]	均值±SD	均值±SD
<1 500	1 065.60± 20.34(0.29) a	3 349.65± 94.00(0.42) a	2 284.05± 93.81(0.62) a	36.50±16.19	63.50±16.19
1 500~2 250	1 806.00± 13.14(0.11) b	4 362.90± 56.95(0.20) b	2 556.90± 54.78(0.32) a	42.90±9.84	57.10±9.84
2 250~3 000	2 544.60± 17.61(0.10) c	4 349.25± 14.87(0.05) b	1 804.65± 25.92(0.22) b	59.02±7.54	40.98±7.54
3 000~3 750	3 272.10± 13.29(0.06) d	5 531.70± 69.52(0.19) c	2259.60± 69.94(0.46) a	66.91±19.20	39.52±12.29
>3 750	4 315.65± 28.22(0.10) e	7 460.70± 150.98(0.30) d	3145.05± 163.17(0.78) c	62.99±25.69	37.01±25.69
平均	2 596.35± 84.03(0.49)	4 931.40± 103.30(0.31)	2 335.05± 36.35(0.23)	53.66±13.24	46.34±13.24

注:字母标注基于单因素方差分析(ANOVA)和 Tukey HSD 多重比较检验($p < 0.05$)确定,变异系数(CV) = 标准差(SD)/均值,反映数据相对离散程度。

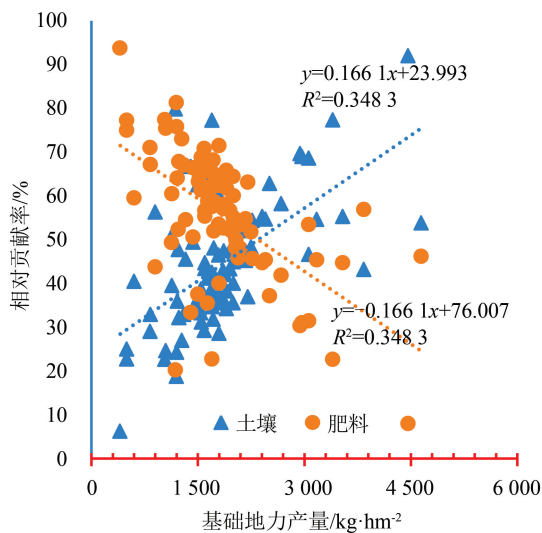


图 1 基础地力产量与土壤和肥料贡献率的关系

2.2 基础地力产量与土壤各养分贡献率的关系

土壤中某种养分的贡献率,是通过缺乏该养分时作物产量占平衡施肥时作物产量的百分比来衡量的^[4],这一贡献率能够直观反映出在养分供应不平衡的情况下,土壤中单一养分对作物产出的影响程度,在农业生产中意义重大,可作为相对产量,用于构建养分丰缺指标体系。该体系能够帮助农户和农业专家快速判断土壤中养分的盈缺情况,进而为施肥推荐提供科学依据,让施肥方案更贴合土壤实际情况,在提高作物产量的同时,提升肥料利用效率,减少资源浪费和环境污染。

基础地力产量是评估青稞田块肥料需求的重要量化依据,对指导精准施肥、优化养分管理具有关键作用。通过图 2 发现,在历年来各青稞试验点,拉萨市农田土壤基础地力产量与缺肥区相对产量呈现出对数关系,即随着基础地力产量的提升,缺肥区产量也随之提高。分析决定系数(R^2),表现出氮、磷、钾逐渐增加的趋势,意味着基础地力与氮的相关性最为显著,其次是钾,与磷的相关性最低。在高寒区,青稞生长环境特殊、周期较短,需充分利用有限的生长时间与资源,尤其是在分蘖这一关键阶段。而氮素相关性最强这一结果,与青稞的这些生理特性紧密相关。对于普通农户而言,相较于开展肥效试验以及进行土壤测试,获取基础地力产量的方式要简便得多。因此,若能将基础地力产量纳入施肥推荐体系,无疑会极大地提升施肥推荐工作的可操作性。

2.3 土壤基础地力贡献率与施肥增产量的关系

从图 3 能够清晰看到,在全市农田青稞种植环境下,土壤氮、磷、钾贡献率与氮磷钾肥料增产量间呈现反向关联态势。具体而言,在中低地力水平的土壤里,单位化肥催生的增产量要高于高地力水平的土壤。就氮、磷、钾三者而言,相关系数呈逐步上升走向。相较于氮元素,土壤磷、钾贡献率与对应肥料增产量之间的相关性更为显著。

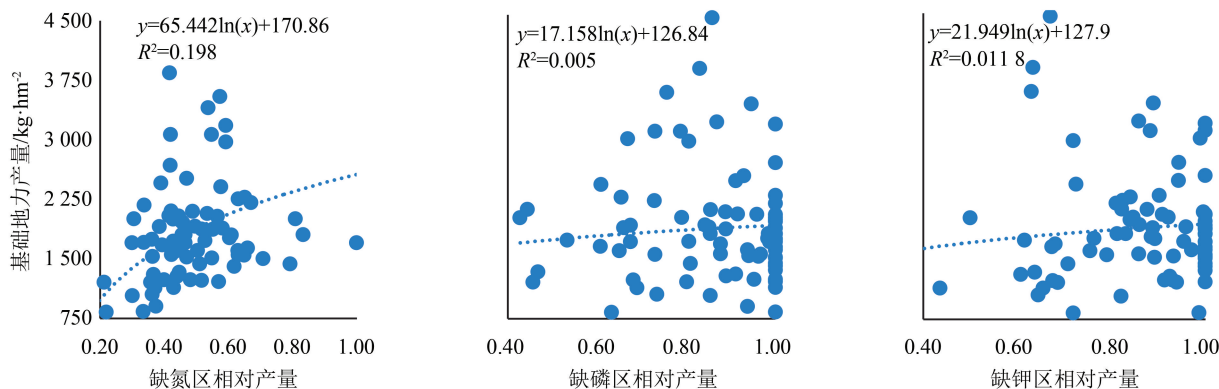


图2 土壤氮磷钾贡献率与基础地力产量的关系

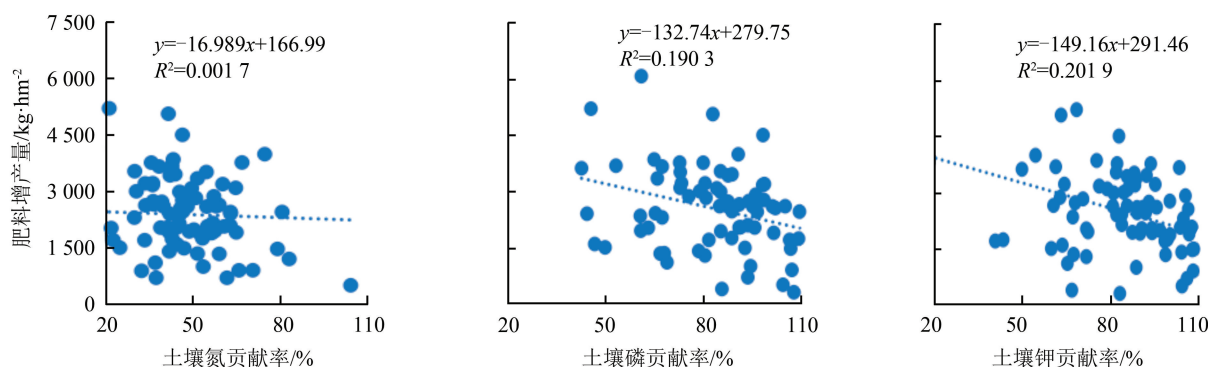


图3 土壤氮磷钾贡献率与氮磷钾肥增产量的关系

从图4可知,拉萨市农田基础地力产量与施肥产量为线性相关关系,随着农田基础地力的提升,基础地力产量逐渐提高,施肥产量也随之提高。图5表明,农田土壤基础地力等级与施肥增产量存在一定关系。在基础地力等级为低地力水平时,农田基础地力与施肥增产效应存在显著的协同增长关系,随着地力等级由低到高进阶,肥料投入的增产潜力逐步释放。当基础地力产量处于1500~2250 kg/hm²水平时,施肥增产量达到2565.00 kg/hm²;达到2250~3000 kg/hm²中等地力水平时,施肥增产量出现下降,肥料增产量只有1785.00 kg/hm²。从2250~3000、3000~3750、≥3750 kg/hm²中高地力水平开始,随着农田土壤基础地力产量等级的提高,施肥增产量也在不断升高,当基础地力产量上升到≥3750 kg/hm²时,施肥增产效应最高,肥料增产量达到3150.00 kg/hm²。综合来看,在基础地力产量在1500~3000 kg/hm²,肥料增产效果集中度最高,说明此基础地力的土壤有着较高的增产潜力。

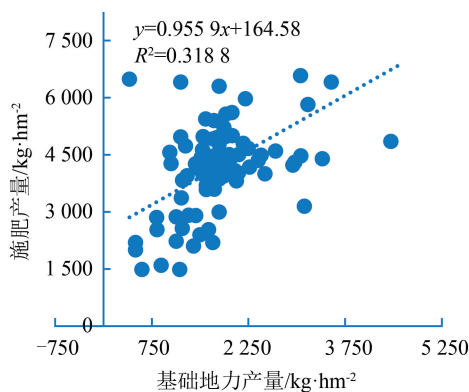


图4 土壤基础地力产量与施肥产量的关系

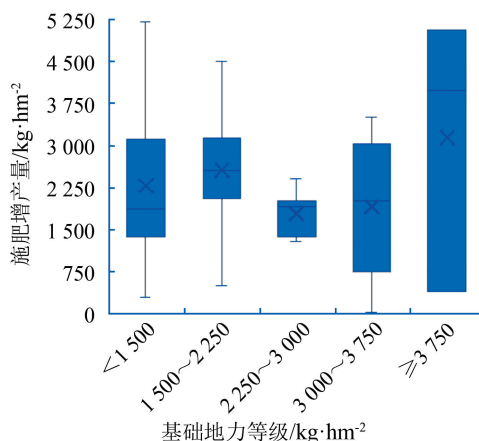


图5 基础地力等级与施肥增产量的关系

2.4 基础地力与产量稳定性和可持续性的关系

基础地力宛如农业生产的基石,与产量稳定性和可持续性紧密相连。在产量稳定性层面,基础地力高的土壤,养分储备丰富,结构优良,能在外界环境波动时,像坚固的盾牌一样,持续为作物供应养分、调节水分,有效抵御旱涝等逆境冲击,减少产量波动。而在产量可持续性方面,它是维持土壤生态平衡的关键。高基础地力土壤中,微生物活跃,生态系统稳定,能减少对化肥等外部投入的过度依赖,避免土壤退化,如同为农业生产注入源源不断的动力,保障作物产量在长期内稳步增长,实现农业的可持续发展。

为明确其层次差异,本研究以升序排列方式,将拉萨市农田土壤基础地力产量进行了5级梯度划分(见1.3),分别计算每个等级可持续性指数和稳定性指数。

从图6中折线走势可知,可持续性指数与拉萨市农田土壤基础地力产量分级呈现出先上升后下降的关系,稳定性指数随着土壤基础地力产量分级提升整体呈现先下降后上升的趋势。可持续性指数从基础地力产量分级 $<1\ 500\text{ kg/hm}^2$ 的0.58,逐步上升到 $2\ 250\sim 3\ 000\text{ kg/hm}^2$ 时达到最高值0.95,随后在 $\geq 3\ 750\text{ kg/hm}^2$ 时下降至0.70,这说明在基础地力产量分级较低时,土壤生态系统可能相对脆弱,资源利用效率较低,可持续性较差。随着基础地力产量分级提升,土壤基础地力逐渐增强,养分循环更合理,生态系统稳定性提高,从而使得可持续性指数上升。但当基础地力产量分级达到 $\geq 3\ 750\text{ kg/hm}^2$ 时,可能

是由于过度追求高产,大量使用化肥、农药等,导致土壤结构破坏(如达孜区试验点播前土壤容重 $1.12\sim 1.27\text{ g/cm}^3$,收获后土壤容重增加到 1.33 g/cm^3 ,甚至最高达到 1.40 g/cm^3)、微生物群落失衡,土壤生态环境恶化,进而使可持续性指数下降。

稳定性指数随着基础地力产量分级从 $<1\ 500\text{ kg/hm}^2$ 时的0.42开始下降,在 $2\ 250\sim 3\ 000\text{ kg/hm}^2$ 时达到最低点0.05,随后开始上升,到 $\geq 3\ 750\text{ kg/hm}^2$ 时升至0.30,说明基础地力产量分级较低时,作物生长对土壤原有条件依赖程度相对单一,受外界因素干扰相对较小,产量波动范围窄,稳定性指数较高。随着基础地力产量分级升高,为追求高产,生产管理中土壤的干预增强,如施肥增加、灌溉频繁等,削弱了土壤保水保肥及缓冲能力,致使产量稳定性变差,稳定性指数下降。当基础地力产量分级在 $2\ 250\sim 3\ 000\text{ kg/hm}^2$ 时,可能由于为追求高产,频繁且大量地投入化肥、农药等,改变了土壤的理化性质和生态环境,使土壤环境变得相对脆弱,一旦外界条件(如气候异常、病虫害大暴发等)发生变化,作物产量受影响程度增大,稳定性下降。当基础地力产量分级进一步提高到 $3\ 000\sim 3\ 750\text{ kg/hm}^2$ 及 $\geq 3\ 750\text{ kg/hm}^2$,区间稳定性指数回升,或许是因采用了更科学的种植管理措施,像精准施肥、合理灌溉等,一定程度上修复土壤生态,恢复土壤部分功能,在一定程度上缓解了产量波动,从而使产量稳定性有所回升,稳定性指数上升。

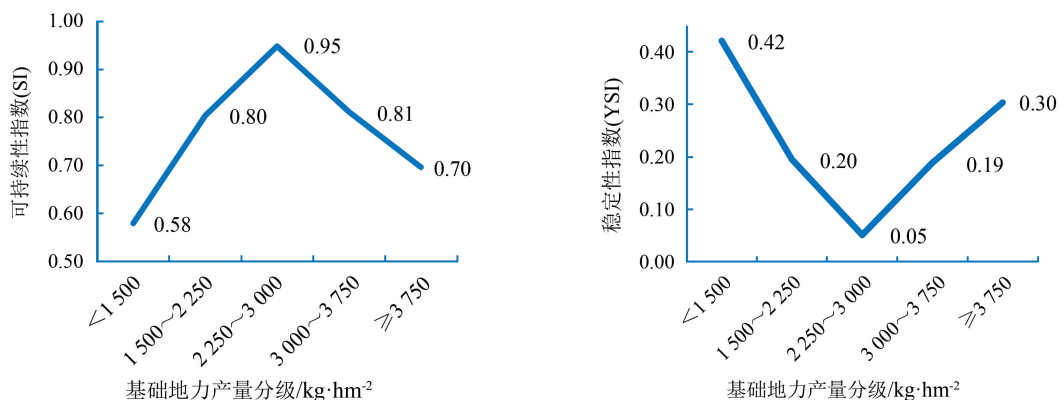


图6 基础地力产量对青稞产量可持续性指数(SI)和稳定性指数(YSI)的影响

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 土壤基础地力水平与施肥、产量的关系

我国目前耕地基础地力水平与国外相比,存

在一定的差距。欧美国家粮食产量的70%~80%靠基础地力,20%~30%靠水肥投入,而我国耕地基础地力对粮食产量的贡献率仅为50%左右^[7]。统计分析近17年91个“3414”田间试验结果,拉萨市农田土壤基础地力产量平均为

2 596.35 kg/hm²,地力贡献率为 53.66%,地力对产量的贡献略超过肥料。分析其原因主要有两点:1)青藏高原地区气候寒冷干旱,成土慢,土壤发育程度低,低温抑制微生物活动,有机质分解转化、养分积累循环慢,土壤贫瘠浅薄、保水保肥能力弱。潘开文等^[8]的研究也证实,高海拔(>3 800 m)田块因低温导致土壤有机质分解速率仅为低海拔的 60%,这与拉萨市氮肥增产率高达 55.69%的低温限制机制一致;而欧美耕地多在温和湿润区,成土充分;2)欧美重视有机肥施用等培肥措施,加之配合合理轮作、休耕等,维持肥力平衡,而我国特别是高寒区因经济、技术限制,对土壤培肥不够重视,有机肥利用不足,化肥施用不合理致养分失衡,地力贡献率待提升。拉萨市农田土壤基础地力贡献率略高于我国三大粮食作物基础地力贡献率(52.7%)和华南区(52.9%),低于东北区(56.5%)、黄淮海区(54.1%)、西南区(53.7%),高于青藏区(40.4%)和甘新区(38.7%)^[9-10]。本研究表明,拉萨市农田土壤氮、磷、钾肥料增产率分别为 55.69%、19.57%和 23.64%,氮肥肥效大于磷肥,这也与青稞在分蘖期、灌浆期等生长周期对氮素需求最为旺盛一致,同时印证了潘开文等^[8]提出的“高海拔低温抑制氮矿化”机制。对比国际高原农业区,东非高原因高温加速磷固定表现为缺磷主导,喜马拉雅南麓因水热条件复杂呈现氮磷共限,而拉萨市作为中高纬度极端高寒区,因低温强烈抑制氮矿化,形成“氮肥主导”的独特养分限制特征^[11-12]。这种区域差异提示,拉萨市在强化氮肥管理的同时,可借鉴东非“秸秆还田保磷”经验,如同作固磷植物,以协同提升养分利用效率。具体举措为:依据地力等级制定差异化施肥策略,低产田优化种植制度、调整种植模式,轮作、间作合理搭配,探索休耕制度,提升土壤自我修复能力,同时侧重氮肥高效利用;高产田推行“控氮增有机”,实现可持续发展;中等地力田块注重养分投入与生态保护的动态平衡,实现“用地与养地结合”的可持续目标。

3.1.2 地力提升与高效养分资源利用的优化路径

拉萨市地处西藏高海拔冷凉区域,土壤形成过程缓慢,土壤发育程度低、土层薄,土壤质地多为砂土或砂质壤土,保水保肥性能差,且低温条件下微生物活动较弱,有机质分解缓慢,同时,气候干旱少雨,降水分布不均,不利于养分的释放

和积累,导致基础地力难以提升。潘开文等^[8]发现,拉萨市河谷青稞田土壤有机质与基础地力产量(Y_0)呈显著正相关($R^2 = 0.78$),但高海拔(>3 800 m)田块土壤有机质分解速率仅为低海拔的 60%,进一步印证了低温对土壤养分转化的限制作用。

高地力耕地不仅具备更高的产量稳定性和生态可持续性,还能显著降低作物对化肥的依赖,减少养分投入强度。研究证实,并非基础地力产量分级越高,可持续性就越好。盲目追求超高产可能牺牲土壤可持续性,不利于农业长期发展。Sun 等^[13]的研究显示,过度施氮会导致土壤微生物碳氮比从 9.5 降至 7.2,破坏微生物群落平衡,这与拉萨市高产田“氮素盈余导致微生物功能受限”的现象一致,佐证了控氮的必要性。针对不同地力等级的优化路径,潘开文等^[8]提出的“有机肥替代 15%氮肥+春季浅耕”组合技术颇具参考价值,该技术可使中等地力田(2 250~3 000 kg/hm²)的氮素利用率提升至 42%(本研究中拉萨市为 38%),同时将氮淋失率从 22%降至 12%,与本研究“中等地力田需协同养分投入与生态保护”的结论高度契合。此外,Chhetri 等^[11]基于地统计学研究发现,拉萨河谷地形湿度指数(TWI)6.5~8.0 区间(中等湿润)对应地力 2 250~3 000 kg/hm²,提示该区间需通过等高种植+秸秆覆盖调节土壤湿度,以维持地力稳定。

从微生物调控角度看,Sun 等发现,接种 *Bacillus* 和 *Pseudomonas* 复合菌剂可使退化草甸地力贡献率提升 15%,而潘开文等也证实耐寒固氮菌 *Bacillus Xizangensis* 丰度与地力贡献率正相关($r = 0.65$)^[8,13]。这为拉萨市推广“菌剂+有机肥”协同方案提供了微生物生态学依据,尤其适用于低产田(<1 500 kg/hm²)的地力修复。

我们不能一味追求基础地力产量的提升而忽视产量稳定性,应重点关注 2 250~3 000 kg/hm²这一稳定性较差区间的农田,这部分区域总体上土壤容重较高,一般在 1.30 g/cm³ 以上,有机质含量一般低于 25 g/kg,处于低或较低水平,土壤保水保肥能力差,要注重土壤的可持续利用,避免过度开发,谨慎考量投入产出,规避产量大幅波动风险,探索并推广此区间内维持土壤健康、保障可持续性的生产模式与技术措施,如休耕、合理轮作、精准施肥、复种绿肥、增施商品有机肥、推广农家肥高温堆肥技术和绿色防控病虫害

技术等措施,在提高基础地力产量的同时,维持或提高产量稳定性,以实现产量与可持续性的平衡。

3.2 结论

3.2.1 地力基础决定产量潜力

拉萨市“3414”田间肥效试验数据显示,土壤基础地力产量平均为 2 596.35 kg/hm²,对应地力贡献率为 53.66%,表明土壤基础地力对产量的贡献占比高于肥料投入,是决定青稞产量的主导因素。研究进一步证实,基础地力产量与地力贡献率呈显著正相关关系,与肥料贡献率呈显著负相关^[7,14],这一规律表明,高基础地力耕地可有效降低对肥料的依赖,通过提升土壤本底肥力即可实现化肥减量增效。

3.2.2 施肥策略需差异化

中低地力土壤对化肥的响应更为敏感,肥料投入的增产效益明显高于高地力土壤,随着土壤基础地力从低到高变化,土壤氮、磷、钾对产量的贡献率逐步提升,而肥料氮、磷、钾的贡献率及增产效率则呈下降趋势。其中,氮肥仍是促进青稞增产的核心养分,其作用强度远超磷、钾元素。因此,低产田应强化氮肥投入,在当前最佳推荐施肥水平的框架下,建议将氮肥投入量提升至现有水平的 1.2~1.5 倍;高产田需重点控制氮肥施用,建议采用商品有机肥或本地积造农家肥替代 10%~20% 的化肥氮,这与潘开文等^[8]的“有机肥替代 15% 氮肥”技术方案相呼应,可有效提升土壤有机质含量并改善微生物活性。结合 Chhetri 等^[11]的统计学模型,拉萨河谷“TWI 6.5~8.0 区间”的精准管理阈值可进一步细化为:有机肥施用量 ≥ 30 t/hm²、氮肥用量 ≤ 120 kg/hm²,通过“空间差异化施肥”将地力贡献率稳定在 55%~60%,同时降低氮淋失风险($<15\%$)。

3.2.3 可持续性管理关键

实现农田可持续管理的核心在于精准把控地力水平。中等地力(2 250~3 000 kg/hm²)的农田为最优管理区间,是管理的核心切入点,需兼顾作物养分需求与生态承载能力。Sun 等^[13]的研究表明,该区间“*Bacillus-Pseudomonas* 互作强度”是低产田的 2.1 倍,功能菌群协同作用显著,这为通过“菌剂+有机肥”协同调控维持地力稳定提供了微生物学依据。

通过精准调控肥料用量、推广有机替代等措施,既能充分挖掘土地生产潜力,又能筑牢生态安全屏障,确保农业生产的长期稳定。这一管理

范式不仅适用于拉萨市,更可为全球高原农业区(如喜马拉雅、东非高原)的可持续发展提供参考,推动“气候智能型施肥”理念在极端环境下的实践应用。

参考文献:

- [1] 查燕.长期不同施肥条件下黑土区春玉米农田基础地力演变特征[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [2] 西藏自治区农业农村厅.2023年西藏耕地质量监测报告[M].拉萨:西藏人民出版社,2023.
- [3] 张水清,黄绍敏,姜翼来,等.华北潮土区土壤基础地力研究[J].中国农学通报,2016,32(20):97-100.
- [4] 梁涛,陈轩敬,赵亚南,等.四川盆地水稻产量对基础地力与施肥的响应[J].中国农业科学,2015,48(23):4759-4768.
- [5] 徐春丽,谢军,王珂,等.中国西南地区玉米产量对基础地力和施肥的响应[J].中国农业科学,2018,51(1):129-138.
- [6] 王迎男,高娃,郜翻身,等.内蒙古马铃薯主产区基础地力及增产潜力研究[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1345-1353.
- [7] 梁涛.基于土壤基础地力的施肥推荐研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [8] 潘开文,何燕,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[J].应用与环境生物学报,2024,28(4):813-821.
- [9] 李官沫,张文菊,曲潇琳,等.旱作种植条件下基础地力贡献率演变特征及影响因素分析[J].中国农业科学,2021,54(19):4132-4142.
- [10] 李玉浩,王红叶,崔振岭,等.我国主要粮食作物耕地基础地力的时空变化[J].中国农业科学,2022,55(20):3960-3969.
- [11] TERESSA D, KIBRET K, DECHASA N, et al. Soil properties and nutrient uptake of maize (*Zea mays*) as influenced by mixed manure and blended inorganic fertilizer in Haramaya district, eastern Ethiopia[J]. Heliyon, 2024, 10(16):e35784.
- [12] DROLLINGER S, MULLER M, KOBL T, et al. Decreasing nutrient concentrations in soils and trees with increasing elevation across a treeline ecotone in Rolwaling Himal, Nepal[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(5):843-858.
- [13] SUN Y, ZHANG X J, YANG Y S, et al. Alpine meadow degradation regulates soil microbial diversity via decreasing plant production on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2024, 163:112097.
- [14] 黄少辉,贾良良,杨云马,等.边界线法解析冀中南麦区基础地力产量的土壤养分影响因子[J].农业工程学报,2019,35(6):141-148.