

# 氮、磷、硅营养及交互作用对青稞“13-5171-7” 生长及产量的影响

彭 君, 韦泽秀\*, 卓 玛

(省部共建青稞与牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室/西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 西藏 拉萨 850002)

**摘 要:** 为了解氮(N)、磷(P)、硅(Si)营养对春青稞新品系“13-5171-7”生长及产量的影响, 设计了3因素2水平完全随机区组试验, 分析了青稞灌浆期基部第二叶片丙二醛、株高、产量及产量因子指标, 结果表明: (1) N, P, Si及N×Si交互作用对“13-5171-7”株高的影响极有统计学意义( $p<0.01$ ), Si对基部第2叶片丙二醛含量的影响极有统计学意义( $p<0.01$ ); (2) 增施N, P, Si营养, 青稞“13-5171-7”的产量均不同程度地提高, 其中单施Si肥和P肥(T2, T3)“13-5171-7”产量较CK的差异无统计学意义( $p>0.05$ ), 增施N肥以及N肥与P肥、Si肥配合施用、Si肥与P肥配合施用处理, “13-5171-7”的产量较CK处理青稞产量都显著提高( $p<0.05$ ); (3) 增施N, P, Si营养对“13-5171-7”的穗长、穗粒数、成穗数和千粒质量有不同程度的提高, N, P, Si对穗粒数的影响差异有统计学意义( $p<0.05$ ), 从而极显著影响产量( $p<0.01$ )。该研究中T5(N: 8 kg/667 m<sup>2</sup>)、T6(N: 8 kg/667 m<sup>2</sup>, 途保佳 120 mL/667 m<sup>2</sup>)处理“13-5171-7”平均产量较高。

**关键词:** 氮; 磷; 硅; 交互作用; “13-5171-7”青稞新品系; 产量; 产量因子

中国分类号: S512.3; S143

文献标志码: A

## Effects of N, P and Si Nutrition and Their Interaction on Growth and Yield of Highland Spring Barley New Strain ‘13-5171-7’

PENG Jun, WEI Zexiu\*, Zhuoma

(State Key Laboratory of Highland Barley and Yak Germplasm Resources and Genetic Improvement /Institute of Agricultural Resources and Environment Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tibet Lhasa 850002, China)

**Abstract:** To understand the effects of N, P and Si nutrition on the growth and yield of spring highland barley new strain 13-5171-7, a complete randomized experiment with three factors and two levels was designed. The indexes of malondialdehyde (MDA) of the basal second leaf at the grain filling stage, plant height, yield and yield factor were analyzed. The results showed that: (1) N, P, Si and the interaction of N\* Si had a significant effect on the plant height of ‘13-5171-7’ ( $p<0.01$ ). Si had a significant effect on the MDA content of basal second leaf ( $p<0.01$ ); (2) with the nutrition of N, P and Si supplying, the yield of highland barley ‘13-5171-7’ increased significantly at different degree. However, the yield of ‘13-5171-7’ was no significant difference with that of CK ( $p>0.05$ ) by applying silicon fertilizer and phosphorus fertilizer (T2 and T3) alone, and the yield of ‘13-5171-7’ was significantly higher than that of CK treatment by increasing n fertilizer, combination of N, P and Si fertilizer, or combination of silicon fertilizer and P fertilizer; (3) the panicle length, the grain number per panicle, panicle number and 1000 grain weight of ‘13-5171-7’ increased by increasing application N, P and Si fertilizer. Especially the effect on the grain number per panicle was significantly ( $p<0.01$ ). The conclusion was the treatments of T5 (n: 8 kg/667 m<sup>2</sup>) and T6 (n: 8 kg/667 m<sup>2</sup>, Si fertilizer 120 mL/667 m<sup>2</sup>) were better than others with higher average yield.

**Key Words:** N; P; Si; interaction; highland barley new strain ‘13-5171-7’; yield; yield factor

青稞是青藏高原重要的粮饲兼用作物, 其种植面积超过耕地面积的60%, 产量也超过粮食总产量

的60%, 青稞生产对保障西藏粮食安全和农民增收具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。近年来, 有研究证实硅(Si)是一种有益于植物生长发育的矿质元素, 在水稻生产中被广泛利用, 施Si能促进植物对Si的吸收利用, 植物产生的硅化细胞可提高作物的抗逆性<sup>[3-5]</sup>, 增加茎秆抗倒伏能力, 适量补充Si肥还可以促进作物的生长发育。氮(N)、磷(P)是植物生长发育过程中大量需要的营养元素, 在青稞生产中广泛施用, 有关施肥模式对青稞产量的影响<sup>[6-7]</sup>, 或单一营养

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 省部共建国家重点实验室自主课题(XZNKY-2021-C-014-Z11)、西藏自治区科技计划项目(XZ202101ZD0004N)

作者简介: 彭君(1978-), 男, 硕士, 主要从事农作物新品种选育及配套栽培技术研究, E-mail: pj0891@163.com; \*为通讯作者: 韦泽秀(1978-), 女, 理学博士, 主要开展土壤生态及作物生理生态研究, E-mail: weizex7559@126.com。

元素对青稞产量的影响<sup>[8-10]</sup>报道较多,其中关于Si肥对青稞生长的影响却鲜有报道,有关Si肥与N,P营养的交互作用对青稞的影响无相关报道。

“13-5171-7”是西藏农科院农业研究所近年选育的高产春青稞新品系,为了提高肥料利用率,发掘青稞新品种的生产潜力,开展“13-5171-7”青稞新品种高产栽培肥料运筹,可以了解N,P,Si等营养对“13-5171-7”生长及产量的影响,为“13-5171-7”高产栽培提供理论依据和技术支撑,因而具有十分重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021年4月—2021年9月在西藏农牧科学院4号试验地进行(29°38'34"N,91°2'31"E,海拔3 662 m)。高原温带季风半干旱气候,年平均温度8.0℃,年日照时数2 991.6 h,≥0℃积温3 015.0℃,年降水量为426.5 mm,集中在6—9月份,年无霜期130 d<sup>[11]</sup>。试验地0~20 cm土层土壤质地为砂壤土,有机质含量26.07 g/kg,全氮2.35 g/kg,碱解氮158.07 mg/kg,全磷1.35 g/kg,有效磷173.06 mg/kg,全钾5.58 g/kg,速效钾57.12 mg/kg,pH值为7.42,电导率为168.2 μs/cm。

1.2 试验设计

以“13-5171-7”青稞新品系为供试春青稞品系,青稞播量为14 kg/667 m<sup>2</sup><sup>[12]</sup>,设计N(0,8 kg/667 m<sup>2</sup>)、P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(0,5 kg/667 m<sup>2</sup>)、Si(0,120 mL/667 m<sup>2</sup>),3因素2水平完全随机区组试验共8个处理(表1),试验中肥料:尿素(N:46%,云南云天公司生产),过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:12%,甘肃虎豹化工生产),途保佳(Si:≥100 g/L,韩国翱得思株式会社)具体处理及编号见表1。Si肥在苗期喷施,N肥和P肥基施50%,拔节期追施50%,小区面积3 m×4 m,3次重复,随机排

列,2021年4月15日播种,2021年8月20日收获,其他田间管理一致。

1.3 测定项目和方法

- 1)不同处理灌浆期基部第2叶片丙二醛含量  
2021年7月8日(“13-5171-7”处于灌浆期),在田间随机选取10片基部第2完整叶片,标记清楚带回实验室,放置于冰箱冷冻保存。7月9日采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[13]</sup>测定叶片丙二醛含量。
- 2)“13-5171-7”株高、穗长、穗粒数、成穗数测定  
在青稞腊熟期,每个小区随机选取10株未倒伏植株测定株高、穗长和穗粒数,并用1 m<sup>2</sup>样方每个小区随机选取1 m<sup>2</sup>测定成穗数,并将1 m<sup>2</sup>内青稞收割装袋悬挂在凉棚下晾晒。

- 3)产量和千粒质量测定  
每个小区单打单收,清理,种子晾干后称质量得到小区产量,并用小区产量折算每667 m<sup>2</sup>产量;麦类作物数粒板和数粒仪同时使用,每个小区种子数6个1 000粒,用0.01 g精度天平称量获得千粒质量。

1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2010和DPS9.50软件进行多因素方差分析和Duncan多重比较和相关性分析。

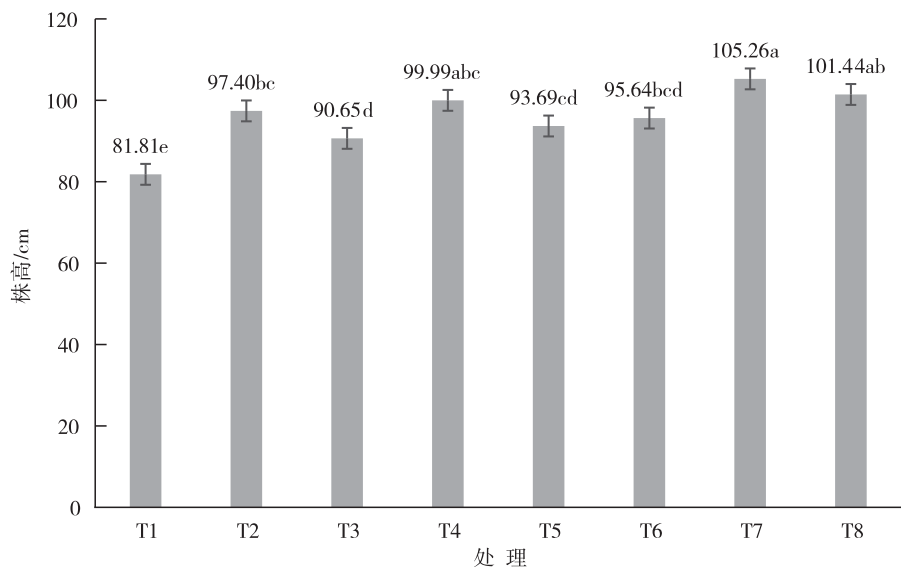
2 结果与分析

2.1 N,P,Si及交互作用对“13-5171-7”株高的影响

不同处理“13-5171-7”在蜡熟期测定平均株高,结果见图1。增施N,P,Si单质元素或混合元素营养“13-5171-7”植株株高较CK(T1)处理株高都显著增高( $p<0.05$ ),其中株高最高的3个处理为:N和P配施组合(T7)植株平均株高最高,为105.26 cm;其次为N,P,Si配施组合(T8),平均株高101.44 cm;P和Si配施组合(T4)植株平均株高第3,为99.99 cm。这3个处理间株高差异无统计学意义( $p>0.05$ )。

表1 试验设计

| 处理代号 | 处理  |
|------|---|
| T1   | NOPSi0  |
| T2   | Si(途保佳:120 mL/667 m <sup>2</sup> )  |
| T3   | P(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :5 kg/667 m <sup>2</sup> )  |
| T4   | Si+P(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :5 kg/667 m <sup>2</sup> ,途保佳:120 mL/667 m <sup>2</sup> )                              |
| T5   | N(N:8 kg/667 m <sup>2</sup> )   |
| T6   | Si+N(N:8 kg/667 m <sup>2</sup> ,途保佳:120 mL/667 m <sup>2</sup> )   |
| T7   | N+P(N:8 kg/667 m <sup>2</sup> ,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :5 kg/667 m <sup>2</sup> )                                   |
| T8   | N+P+Si(N:8 kg/667 m <sup>2</sup> ,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :5 kg/667 m <sup>2</sup> ,途保佳:120 mL/667 m <sup>2</sup> ) |



小写字母不同表示差异有统计学意义 ( $p<0.05$ )。

图1 不同处理“13-5171-7”收获期株高

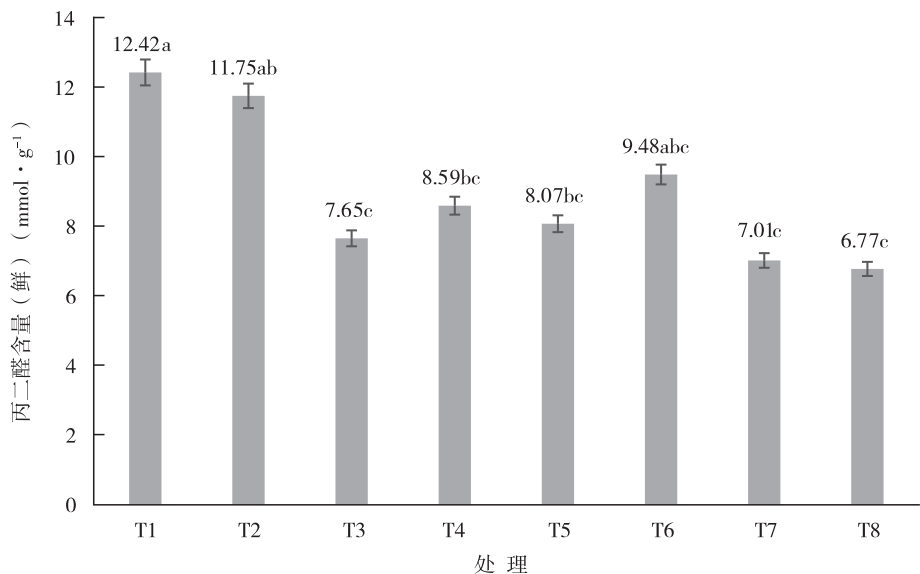
对不同处理“13-5171-7”蜡熟期株高进行3因素随机区组试验方差分析,结果见表2。N,P,Si单质元素以及氮硅交互作用对株高影响极有统计学意义( $p<0.01$ ),N与P交互作用、P与Si交互作用、N,P,Si交互作用对“13-5171-7”株高的影响差异无统计学意义( $p>0.05$ )。

2.2 N,P,Si及交互作用对“13-5171-7”叶片丙二醛的影响

叶片丙二醛表现叶片衰老程度或逆境下膜脂过氧化伤害情况,在灌浆期采集不同处理根部第2片完整叶片,带回实验室采用与硫代巴比妥酸反应后双组分分光光度法进行测定,结果见图2。不同

表2 N,P,Si及交互作用对“13-5171-7”株高影响方差分析表

| 变异来源    | 平方和        | df | 均方差       | F值       | p值      |
|---------|------------|----|-----------|----------|---------|
| N×      | 685.130 6  | 1  | 685.130 6 | 18.353 3 | 0.000 1 |
| P×      | 829.44     | 1  | 829.44    | 22.219 1 | 0       |
| Si×     | 531.302 5  | 1  | 531.302 5 | 14.232 6 | 0.000 4 |
| N×P×    | 35.402 5   | 1  | 35.402 5  | 0.948 4  | 0.334 3 |
| N×Si×   | 718.24     | 1  | 718.24    | 19.240 3 | 0.000 1 |
| P×Si×   | 144.600 6  | 1  | 144.600 6 | 3.873 6  | 0.054 0 |
| N×P×Si× | 0.2256     | 1  | 0.225 6   | 0.006 0  | 0.938 3 |
| 误差      | 2090.482 5 | 56 | 37.33     |          |         |
| 总和      | 5034.824 4 | 63 |           |          |         |



小写字母不同表示差异有统计学意义 ( $p<0.05$ )。

图2 不同处理“13-5171-7”叶片丙二醛含量

处理后“13-5171-7”基部第2叶片丙二醛平均含量从大到小依次为:T1,T2,T6,T4,T5,T3,T7,T8。T1处理在整个生育期末施用肥料,营养全来自土壤,基部第2叶片丙二醛平均含量最高,表明叶片膜脂过氧化程度最高,叶片膜损伤程度相较其他处理大。补充N,P,Si营养,叶片丙二醛含量下降,能一定程度缓解叶片膜损伤,延缓叶片衰老。

2.3 N,P,Si及交互作用对“13-5171-7”产量及产量因子的影响

对不同处理小区产量单打单收,并折算每667 m<sup>2</sup>产量,产量及产量因子结果见表3。从产量

上看,单施Si肥和P肥(T2,T3)“13-5171-7”产量较CK(T1)一定程度提高,但差异无统计学意义( $p>0.05$ ),Si肥与P肥配合施用(T4)处理“13-5171-7”产量较T1处理差异有统计学意义( $p<0.05$ )。增施N肥以及N肥与P肥、Si肥配合施用处理“13-5171-7”产量较CK和Si肥、P肥单施或配合施用处理青稞产量都显著提高( $p<0.05$ ),但增施N肥以及N肥与P肥、Si肥配合施用处理间青稞产量差异无统计学意义。

穗长是作物本质特性之一,本研究中“13-5171-7”平均穗长6.00~8.63 cm,增施N,P,Si肥青

表3 不同处理“13-5171-7”产量及产量因子

|    | 产量/(kg·667 m <sup>-2</sup> ) | 穗长/cm       | 穗粒数/(粒·穗 <sup>-1</sup> ) | 成穗数/(株·m <sup>-2</sup> ) | 千粒质量/g       |
|----|------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| T1 | 205.12±23.50c                | 6.00±0.38c  | 43.38±2.01c              | 187.67±18.84b            | 46.70±1.16b  |
| T2 | 255.12±14.11bc               | 6.38±0.32bc | 49.25±2.39bc             | 206.67±16.97ab           | 48.66±1.33ab |
| T3 | 266.01±5.21bc                | 7.13±0.44bc | 50.88±3.19abc            | 255.00±30.79a            | 49.75±0.56ab |
| T4 | 284.90±35.58b                | 7.50±0.27ab | 56.25±4.08ab             | 214.33±7.45ab            | 48.65±0.93ab |
| T5 | 449.58±10.04a                | 8.63±0.46a  | 57.50±3.02ab             | 204.67±13.91ab           | 49.41±0.93ab |
| T6 | 420.02±21.17a                | 7.25±0.41b  | 57.75±4.38ab             | 221.00±9.85ab            | 48.26±1.12ab |
| T7 | 396.46±20.46a                | 7.38±0.53b  | 60.00±5.08a              | 218.00±17.95ab           | 51.25±0.67a  |
| T8 | 389.80±12.70a                | 7.63±0.32ab | 62.25±4.23a              | 193.00±14.01b            | 48.63±0.53ab |

注:同一列小写字母相同表示差异无统计学意义( $p>0.05$ ),小写字母不同表示差异有统计学意义( $p<0.05$ )。

稞穗长有不同程度增加,其中增施N肥“13-5171-7”穗长增加明显( $p<0.05$ ),P肥和Si肥对“13-5171-7”穗长影响差异无统计学意义。穗粒数变化规律与穗长变化规律基本一致,但N肥与P硅肥配合施用穗粒数增加,穗子的瘪粒数量减少。成穗数能体现青稞群体大小,本研究中“13-5171-7”平均成穗数187.67~255.00株/m<sup>2</sup>,增施肥料“13-5171-7”成穗数提高,但各处理间无统一规律。本研究中“13-5171-7”平均千粒质量为46.70~51.25g,增施N,P,Si营养“13-5171-7”平均千粒质量提高,除T7处理(N和P配合施用)外与CK处理差异无统计学意义( $p<0.05$ )。

对N,P,Si及交互作用进行方差分析和多重比较,结果见表4。从产量总体看,N素以及N和P交互作用对产量的影响差异极有统计学意义( $p<0.01$ ),P,Si以及N和Si交互作用、P和Si交互作用、N,P,Si交互作用对产量的影响差异无统计学意义

( $p>0.05$ )。从产量因子分析,本研究中N以及N和P交互作用对穗长的影响差异极有统计学意义( $p<0.01$ ),其他因素对穗长的影响差异无统计学意义;N,P,Si单质元素对穗粒数的影响差异极有统计学意义,但N,P,Si交互作用对穗粒数的影响差异却无统计学意义。N,P,Si及其交互作用对成穗数和千粒质量的影响均达不到显著水平( $p>0.05$ )。

表4 氮磷硅及交互作用的方差分析F值表

| 差异来源    | 产量       | 穗长      | 穗粒数     | 成穗数  | 千粒质量 |
|---------|----------|---------|---------|------|------|
| N×      | 131.00** | 11.70** | 12.9**  | 1.3  | 2.01 |
| P×      | 0.017    | 1.47    | 4.26*   | 1.48 | 3.85 |
| Si×     | 0.34     | 0.11    | 10.50** | 0.37 | 1.19 |
| N×P×    | 9.54**   | 7.61**  | 1.44    | 3.27 | 0.1  |
| N×Si×   | 3.48     | 2.74    | 0.71    | 0.07 | 3.01 |
| Si×P×   | 0.02     | 2.06    | 3.15    | 4.15 | 2.89 |
| N×P×Si× | 0.92     | 2.06    | 0.16    | 0.14 | 0.35 |

注:\*表示差异有统计学意义( $p<0.05$ ),\*\*表示差异极有统计学意义( $p<0.01$ )。



表5 株高、产量及产量因子间相关性分析

| 相关系数 | 株高       | 穗长      | 穗粒数      | 成穗数      | 千粒质量   | 产量     |
|------|----------|---------|----------|----------|--------|--------|
| 株高   | 1.0000   |         |          |          |        |        |
| 穗长   | 0.7131*  | 1.0000  |          |          |        |        |
| 穗粒数  | 0.9638** | 0.7583* | 1.0000   |          |        |        |
| 成穗数  | -0.7189* | 0.5457  | 0.6728   | 1.0000   |        |        |
| 千粒质量 | 0.8358** | -0.5018 | -0.7499* | -0.8235* | 1.0000 |        |
| 产量   | -0.5067  | 0.5739  | 0.8373** | 0.5198   | 0.472  | 1.0000 |

注:\*表示相关有统计学意义( $p<0.05$ ),\*\*表示相关极有统计学意义( $p<0.01$ ).

对株高、产量以及产量因子间相关性进行分析,结果见表5。株高与穗长正相关,且有统计意义( $p<0.05$ ),株高与穗粒数和千粒质量正相关,且极有统计意义( $p<0.01$ ),株高与成穗数负相关,且有统计意义( $p<0.05$ ),株高与产量负相关但差异无统计意义( $p>0.05$ );穗长与穗粒数正相关,且有统计意义( $p<0.05$ ),穗长与成穗数、千粒质量、产量相关性无统计意义( $p>0.05$ );穗粒数与千粒质量负相关,且有统计意义( $p<0.05$ ),与产量正相关,且极有统计意义( $p<0.01$ )。成穗数与千粒质量负相关,且有统计意义( $p<0.05$ ),成穗数与产量正相关但无统计意义,千粒质量与产量正相关但无统计意义。

3 讨论与结论

株高指青稞主茎长度,是青稞生物量积累的基础。增施N,P,Si营养,满足青稞生长的营养需求,提高了青稞对光、热资源的同化能力和效率<sup>[14]</sup>株高增高,其中N,P,Si配合施用对株高影响较CK差异有统计意义。魏斌等<sup>[15]</sup>在青稞的研究中发现青稞籽粒产量随株高提高而增加,与籽粒产量呈显著的线性正相关,但本研究中株高与穗长、穗粒数和千粒质量显著正相关,却与成穗数和产量负相关,需要在以后的研究中进行验证。

植物细胞内产生氧自由基和消除氧自由基的平衡被打破,过剩的氧自由基会首先攻击细胞的膜系统,膜脂脂肪酸中的不饱和键被过氧化,最终形成丙二醛(MDA)<sup>[16]</sup>,叶片丙二醛含量表征叶片衰老程度或逆境下膜脂过氧化伤害程度。在青稞生产中增施N,P营养,或N,P,Si配合施用叶片丙二醛含量下降,能一定程度缓解叶片膜损伤,延缓叶片衰老,与周录英等<sup>[17]</sup>的研究结果一致,与战秀梅

等<sup>[18]</sup>在花生研究中结论N,P,Si养分缺乏或过量均会使叶片膜脂过氧化程度加剧,较早地进入衰老状态的结论有差异,应该在之后的青稞研究中需要进一步核实和验证。

有研究表明,Si能够增加玉米、水稻、小麦、大麦、黄瓜和番茄等作物和蔬菜对N,P,Si的吸收,提高植物性产品的质量和数量<sup>[19-20]</sup>。本研究中单施Si肥(T2)对青稞产量增产较CK差异无统计意义( $p>0.05$ ),但Si肥与N和P配合施用(T4,T6,T8)处理青稞产量较CK显著提高( $p<0.05$ )。从产量因子看,Si营养对穗粒数影响极显著。关于青稞生产中Si对N和P营养的协同促进还是拮抗将是后续研究的重点。

N素是西藏土壤养分主要限制因素,增施氮肥对作物产量提高和品质提升有显著效果<sup>[21-22]</sup>。“13-5171-7”生产中增施N肥以及N肥与P肥、Si肥配合施用处理“13-5171-7”株高增加,植株生物量积累增加;基部第2叶片MDA含量降低,延缓衰老;青稞穗长和穗粒数、成穗数和千粒质量都有不同程度的增加,从而提高了产量。T5(N:8 kg/667 m<sup>2</sup>)、T6(N:8 kg/667 m<sup>2</sup>,途保佳120 mL/667 m<sup>2</sup>)处理“13-5171-7”平均产量较高。

参考文献:

[1] 赵慧芬, 栾运芳, 冯西博. 不同农艺措施对西藏春青稞β-葡聚糖含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(5): 888-892.

[2] 西藏自治区统计局, 国家统计局西藏调查总队. 西藏2018统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 157-165.

[3] LIANG Y C, ZHU J, LI Z J, et al. Role of Silicon in Enhancing Resistance to Freezing Stress in Two Contrasting Winter Wheat Cultivars[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(3): 286-294.

[4] PEI Z F, MING D F, LIU D, et al. Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (Triticum Aestivum L.) Seedlings [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2010, 29(1): 106-115.

- [5] YE J, YAN C L, LIU J C, et al. Effects of Silicon on the Distribution of Cadmium Compartmentation in Root Tips of *Kandelia Obovata* (S., L.) Yong [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 369–373.
- [6] 王国强, 薛书浩, 彭 婧, 等. 不同施肥处理对西藏青稞产量和土壤结构的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(5): 1127–1131.
- [7] 马瑞萍, 刘国一, 高 雪, 等. 不同施肥模式对青稞产量、品质及土壤环境的影响[J]. *西藏农业科技*, 2019, 41(S1): 6–10.
- [8] 张建青, 李 猛, 丁桃群, 等. 不同施肥量对青稞产量的影响试验研究[J]. *农业科技通讯*, 2019(7): 149–151.
- [9] 李 雪, 李荣荣, 侯亚红, 等. 氮肥施用对西藏青稞产量及氨挥发损失的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1006–1014.
- [10] 魏 斌, 马占琴. 氮素养分对青稞营养功能特征及籽粒产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(12): 26–32.
- [11] 杜 军. 西藏自治区县级气候区划[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [12] 甘雅文, 唐亚伟, 扎西罗布, 等. 不同种植密度对青稞新品系 13–5171 的产量及农艺性状的影响[J]. *西藏农业科技*, 2019, 41(S1): 47–49.
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2000: 196–197.
- [14] WESTOBY M. A Leaf–Height–Seed (LHS) Plant Ecology Strategy Scheme[J]. *Plant and Soil*, 1998, 199: 213–227.
- [15] 魏 斌, 马占琴. 氮素养分对青稞营养功能特征及籽粒产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(12): 26–32.
- [16] 李 健. 滨藜属四种植物抗旱性生理生化指标研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
- [17] 周录英, 李向东, 汤 笑, 等. 氮、磷、钾肥配施对花生生理特性及产量、品质的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2707–2714.
- [18] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同施肥处理对玉米生育后期叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J]. *玉米科学*, 2007, 15(1): 123–127.
- [19] 刘 辉, 张 静, 杜彦修, 等. 不同硅吸收效率水稻品种根系对硅素水平的响应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 320–324.
- [20] EPSTEIN E, BLOOM A J. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives (Sinauer, Sunderland, MA)[Z]. 2005.
- [21] 刘国一, 尼玛扎西, 宋国英, 等. 西藏一江两河地区青稞生产土壤养分限制因子分析[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(3): 276–280.
- [22] 卓 玛, 曲 航, 马瑞萍, 等. NP 营养对藏青 2000 产量及籽粒营养品质的影响[J]. *西藏农业科技*, 2018, 40(S1): 20–25.