

# 施钾量对藜麦养分吸收及产量的影响

赵玺, 王致和\*, 宿翠翠, 张亚萍, 余亚琳, 马凤捷, 张靖 (甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃武威 733006)

**摘要** [目的]探究土壤速效钾含量和藜麦养分吸收及产量对不同钾肥施用量的响应规律。[方法]通过田间试验分析了不同钾肥施用量(0、40、60、80、100 kg/hm<sup>2</sup>)对土壤速效钾含量、藜麦养分吸收、利用及产量构成的影响。[结果]不同施钾水平下,土壤速效钾含量随藜麦生育期推进呈降低趋势;且施钾量为100 kg/hm<sup>2</sup>水平下,土壤速效钾含量较高。随施钾量的增加,钾肥贡献率、钾肥农学利用率(KAE)及钾肥吸收利用率(KRE)呈先增后减趋势,钾素偏生产力呈减小趋势;藜麦植株中氮、磷、钾素的含量随施钾量的增加呈先增后减趋势,且均在T<sub>3</sub>条件下达到最高;产量构成因素以T<sub>3</sub>处理最高,其产量较T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>分别提高102.58%、61.03%、43.14%、20.67%。[结论]施钾80 kg/hm<sup>2</sup>可获得较高的藜麦产量及钾肥利用效率,是研究区合理的钾肥施用量。

**关键词** 施钾量;藜麦;养分吸收;产量构成

中图分类号 S519 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)10-0134-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.10.030



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Effects of Potassium Application on Nutrient Absorption and Yield of Quinoa

ZHAO Xi, WANG Zhi-he, SU Cui-cui et al (Gansu Academy of Agri-engineering Technology, Wuwei, Gansu 733006)

**Abstract** [Objective] To investigate the response of soil available potassium content, nutrient absorption and yield of quinoa to different potassium application rates. [Method] Field experiments were conducted to analyze the effects of different potassium application rates (0, 40, 60, 80, 100 kg/hm<sup>2</sup>) on soil available potassium content, nutrient absorption, utilization and yield of quinoa. [Result] Under different K application levels, the content of available K in soil decreased with the development of quinoa. The content of soil available K was higher at 100 kg/hm<sup>2</sup>. With the increase of potassium application, the contribution rate of potassium fertilizer, the agricultural utilization rate of potassium fertilizer (KAE) and the absorption utilization rate of potassium fertilizer (KRE) increased firstly and then decreased obviously, and the partial productivity of potassium fertilizer decreased. The contents of N, P and K in quinoa plants increased first and then decreased. N, P and K were the highest in T<sub>3</sub> treatment. Compared with T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> and T<sub>4</sub>, T<sub>3</sub> treatment increased yield by 102.58%, 61.03%, 43.14% and 20.67%, respectively. [Conclusion] Potassium application rate of 80 kg/hm<sup>2</sup> could obtain higher yield of quinoa and utilization efficiency of potassium fertilizer, which was a reasonable potassium application rate in the study area.

**Key words** Potassium level; Quinoa; Nutrient absorption; Yield

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd)属双子叶藜科草本植物,原产于南美洲,是唯一能满足人体营养需求的全营养食品<sup>[1-3]</sup>。自2013年“国际藜麦年”之后,我国山西、青海、甘肃等地陆续开始引进试种。截至2019年,全国藜麦种植面积近1.67万hm<sup>2</sup>,总产量约2.88万t,种植面积和总产量跃居世界第三。甘肃于2011年成功引进,并推广至省内14个地区35个县,种植面积逐年扩增,得利于藜麦耐盐碱、耐干旱、耐低温等特性<sup>[4]</sup>,目前已成为甘肃高海拔、盐碱区、贫瘠区、干旱少雨区的特色经济作物之一。据统计,2019年甘肃藜麦种植面积超过0.6万hm<sup>2</sup>,占全国藜麦种植面积的40%。

钾是藜麦等作物生长发育的必需元素,目前已有较多学者对钾肥与作物产量、品质、肥料利用率、光合等方面开展了研究,结果表明适量施钾可有效防止作物倒伏,促进番茄、小麦等叶绿素合成及光合作用,进而提高作物产量<sup>[5-8]</sup>,改善植株氮、磷、钾吸收能力,提高钾肥利用效率<sup>[9-10]</sup>。随着钾肥用量的增加,植株对氮、磷、钾素吸收量也增加;盆栽藜麦试验表明,当钾肥用量在63 kg/hm<sup>2</sup>时,藜麦干物质及植株氮、磷、钾素累积吸收量均最大<sup>[11]</sup>;钾肥用量的研究集中于小麦、玉米、水稻等大宗作物,对藜麦大田生长的影响报道

较少。

在藜麦生产中,普遍存在不施、少施或过量施钾等现象,不仅不利于产量及钾肥利用率的提升,还会使土壤养分失调,且过量施钾同时会增加生产成本。因此,合理施用钾肥、提高钾肥利用效率是保证藜麦高效生产的关键。钾肥利用率受钾肥施用量及土壤特性等影响较大<sup>[12-13]</sup>。笔者通过分析不同钾肥施用量对“陇藜1号”钾肥养分吸收利用效率及产量的影响,旨在为指导试验区藜麦合理施钾、提高钾肥利用效率及藜麦优质高效生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

**1.1 试验地概况** 试验于2021年在甘肃省农业工程技术研究院试验基地(武威市凉州区黄羊镇)进行。试验区位于河西走廊东端(102°50'59"E, 37°40'29"N),平均海拔1744.5 m,年平均气温8.2℃。多年平均降雨量150 mm,年蒸发量2400 mm。试验区土壤类型为灌漠土,土壤容重1.29 g/cm<sup>3</sup>。0~30 cm土层全氮含量0.87 g/kg、有效磷15.5 mg/kg、速效钾34 mg/kg、有机质8.51 g/kg、pH 8.53、电导率205.9 μS/cm。

**1.2 试验设计** 采用随机区组设计,品种为“陇藜1号”。施钾量设4个水平:T<sub>1</sub>(40 kg/hm<sup>2</sup>)、T<sub>2</sub>(60 kg/hm<sup>2</sup>)、T<sub>3</sub>(80 kg/hm<sup>2</sup>)、T<sub>4</sub>(100 kg/hm<sup>2</sup>)及不施肥T<sub>0</sub>(0 kg/hm<sup>2</sup>),共5个处理,3次重复,15个小区,小区面积35 m<sup>2</sup>,四周设保护带。钾肥采用农用硫酸钾(K<sub>2</sub>O含量24%);氮肥采用尿素(纯氮46.4%),磷肥采用过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 14%),氮、磷、钾肥均于覆膜前以底肥形式一次性施入。采用膜下滴灌,每膜铺

**基金项目** 甘肃省重点研发计划“精准扶贫产业藜麦高效栽培关键技术与示范”(2019-0202-NCC-0123)。

**作者简介** 赵玺(1988—),女,甘肃漳县人,助理研究员,硕士,从事节水灌溉及作物栽培研究。\*通信作者,研究员,从事特色经济作物种质资源创新与高效栽培研究。

**收稿日期** 2022-07-26

设 2 条滴灌带,一膜种植 3 行,膜面宽 1.2 m,株距 30 cm,行距 40 cm,采用人工穴播,每穴播种 3~5 粒种子,播深 2~3 cm。于 2021 年 4 月 16 日播种,4 月 22 日出苗,9 月 10 日收获,生育期 141 d。于播前、花期及灌浆期灌水,病虫害防治等管理措施同大田。

### 1.3 测定内容与与方法

**1.3.1 测产及考种。**藜麦成熟期每个试验小区随机选取 5 株长势一致植株,晾干脱粒后测定单株籽粒质量、单株穗重、千粒重等,换算籽粒产量。

**1.3.2 土壤速效钾。**分别于出苗后第 15 天起每隔 20 d 在每个小区随机选 3 个点用土钻收集 0~30 cm 的土样,土样风干后过 1 mm 筛用于测定速效钾含量,采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提-火焰光度法测定方法。

**1.3.3 植株样中氮、磷、钾含量的测定。**于藜麦出苗后第 14 天起每隔 20 d,每个试验小区随机选取 3 株长势一致的藜麦植株,置于 105 °C 烘箱杀青后 80 °C 烘干至恒重,将植株样粉碎,过 80 目筛后取样,用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  消煮,氮素含量测定采用凯氏定氮仪 (FOSS-8400),磷素含量测定采用钒钼黄比色法,钾素含量测定采用火焰光度法。

**1.3.4 钾肥养分利用效率及相关参数计算。**植株钾积累量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) = 植株干重 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) × 植株钾含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ ) / 1 000

钾肥吸收利用率 = (施钾肥区藜麦钾素总累积量 - 不施钾肥区藜麦钾素总累积量) / 钾肥用量 × 100%

钾肥农学利用率 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) = (施钾区藜麦产量 - 缺钾区藜麦产量) / 施钾量

钾肥偏生产力 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) = 施钾区藜麦产量 / 施钾量

钾肥生理利用率 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) = (施钾区产量 - 缺钾区产量) / (施钾区植株总吸钾量 - 缺钾区植株总吸钾量)

钾肥贡献率 = (施钾肥区藜麦产量 - 不施钾肥区藜麦产量) / 施钾肥区藜麦产量 × 100%

**1.4 数据分析** 采用 Microsoft Excel 2017 进行数据处理,利用 SPSS 21 软件进行统计分析和显著性检验。

## 2 结果与分析

**2.1 钾肥施用量对土壤速效钾含量的影响** 不同施钾量水平下,藜麦各生长时期土壤速效钾含量见图 1。从图 1 可以看出,各处理土壤速效钾含量在 7 月 26 日之前基本呈逐渐降低趋势,7 月 26 日以后趋于平稳。4 个施钾处理土壤速效钾含量均明显高于对照处理  $T_0$ , 分别较  $T_0$  高 5.21%~19.35%、16.67%~67.78%、20.83%~61.47%、6.82%~84.68%, 表明施用钾肥能够增加土壤的供钾能力,有效促进藜麦植株对钾素的吸收。土壤中速效钾含量随施钾量的增加而增加,土壤速效钾含量基本呈  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > T_0$  趋势,处理间差异显著。

**2.2 钾肥施用量对藜麦氮、磷、钾素含量的影响** 从图 2a 可以看出,在整个生育期内藜麦地上部氮素吸收量呈上升趋势;出苗后 55 d (6 月 17 日) 左右各处理藜麦吸收氮素平均为 1.47%, 而出苗后 75、95、115、135 d 的地上部氮吸收量平均分别为 2.40%、3.58%、3.49% 和 3.67%。与对照处理  $T_0$  相

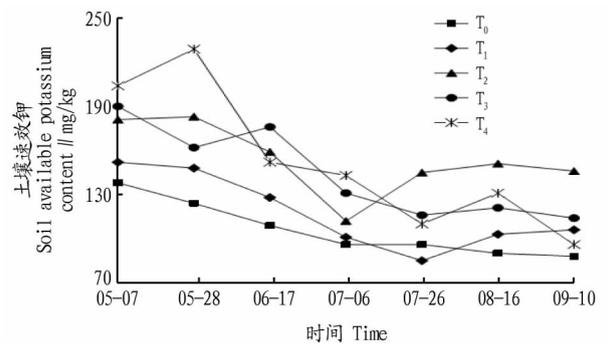


图 1 钾肥施用量对土壤速效钾含量的影响

Fig 1 Effect of potassium application amount on soil available potassium content

比,钾肥处理显著提高了藜麦地上部氮吸收量 ( $P < 0.05$ ), 每个生长时期不施钾处理  $T_0$  植株中氮素含量最低,收获期,施钾处理  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  较不施钾处理  $T_0$  分别高 11.27%、18.87%、31.03%、35.84%; 同一钾肥施用量条件下各生育期藜麦地上部氮吸收量总体呈先增加后趋于平稳趋势,生长约 95 d,藜麦植株中氮素的积累速率较快,其后涨幅不增加。不同生长时期  $T_3$  和  $T_4$  施钾处理的植株中氮含量均高于其他处理,但这 2 个处理间无显著差异。

不同钾肥施用量藜麦植株对磷素的吸收动态见图 2b。由图 2b 可知,全生育期藜麦对磷素吸收量随生育进程呈缓慢上升趋势;与不施钾处理  $T_0$  对比,施用钾肥可以显著提高藜麦不同生长时期植株对磷素的吸收量,各生长时期施钾处理藜麦植株中磷素含量均高于不施钾处理。出苗后 115 d (8 月 16 日) 左右,各处理植株中磷素含量基本达到最大,收获期各处理植株中磷素含量增幅不明显,各生长时期藜麦植株中磷素含量在不同钾肥使用量处理中表现各异,整体而言,整个生育期均以  $T_3$  处理藜麦植株中磷素含量最高, $T_4$  次之,不施钾处理  $T_0$  最低。

不同钾肥施用量藜麦植株中钾素吸收动态见图 2c,整体变化趋势与氮素、磷素一致,各处理植株中钾素含量在整个生育过程中持续上升,趋势明显,在成熟期达到最高;出苗后 55 d (6 月 17 日) 左右各处理藜麦吸收钾素平均为 1.80%, 而出苗后 75、95、115、135 d 时的地上部氮吸收量平均分别为 4.39%、7.07%、7.69% 和 8.37%。施用钾肥可以提高藜麦植株对钾素的吸收。藜麦植株中钾素含量随着施钾水平的提高而不断增高,同期比较,钾素积累量基本呈  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > T_0$  的规律,其中施钾处理  $T_4$  藜麦植株中钾素含量较其他处理均大。各处理于收获时钾素积累量均达到峰值,各处理钾素积累量依次为 6.67%、6.89%、8.97%、9.47%、9.88%,各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。钾素动态变化在出苗后 95 d (7 月 26 日) 左右基本趋于稳定,表明适量施用钾肥有利于促进藜麦早期对钾素的大量吸收。

**2.3 不同钾肥施用量对藜麦产量构成因素的影响** 由表 1 可知,施钾对藜麦单株穗粒重、千粒重、单株穗重及产量均有一定的影响。其中单株穗粒重随钾肥用量的增加呈先增长后下降趋势,不施钾处理  $T_0$  最低,为 32.49 g,施钾处理  $T_3$  最

高,为 41.79 g, T<sub>3</sub> 处理较 T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 分别提高 28.62%、17.52%、10.26%、3.01%;处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 间存在差异,但差异

不显著,但与不施钾处理 T<sub>0</sub> 差异显著,不施钾 T<sub>0</sub> 和低钾处理 T<sub>1</sub> 间差异不显著。

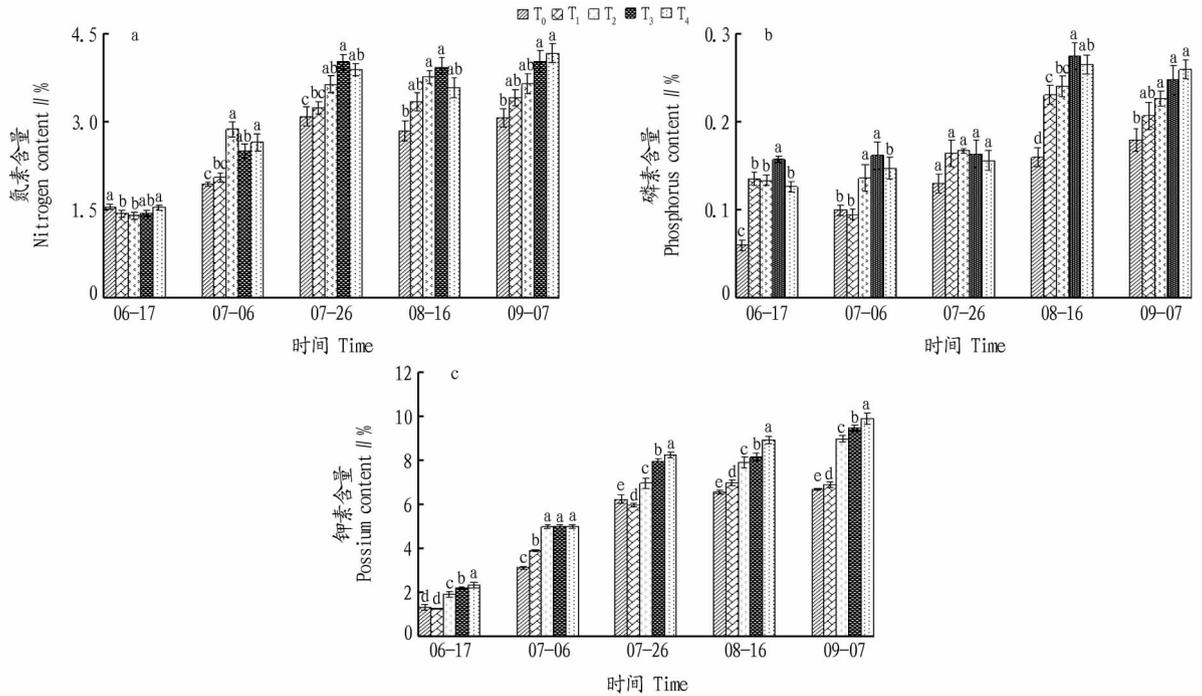


图 2 不同钾肥施用量条件下藜麦全生育期氮、磷、钾素累积量动态变化

Fig.2 Dynamic changes of N, P and K accumulation of *Chenopodium quinoa* during the whole growth period under different potassium application rates

钾肥施用量对藜麦千粒重有一定的影响,藜麦千粒重随着钾肥用量的增加呈先增长后下降趋势,其中不施钾处理 T<sub>0</sub> 的千粒重最低,为 3.75 g,施钾处理 T<sub>3</sub> 的千粒重最高为 4.45 g,分别比 T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 处理高 18.67%、12.66%、5.20%、2.77%。各处理藜麦千粒重从大到小依次为 T<sub>3</sub>>T<sub>4</sub>>T<sub>2</sub>>T<sub>1</sub>>T<sub>0</sub>。其中施钾处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 间差异不显著,不施钾处理 T<sub>0</sub> 和低钾处理 T<sub>1</sub> 间差异也不显著,但施钾处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 与不施钾处理 T<sub>0</sub> 间存在显著差异 (P<0.05)。

钾肥用量对单株穗重有影响,但 5 个处理藜麦的单株穗重相差不大,单株穗重最高为 T<sub>3</sub> 处理,较不施钾处理 T<sub>0</sub> 和

施钾处理 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 分别高 25.11%、20.31%、6.39%、4.86%。其中施钾处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 藜麦单株穗重无显著差异,不施钾处理 T<sub>0</sub> 与低钾处理 T<sub>1</sub> 间差异不显著,但 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 与 T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub> 间差异显著。这说明施钾有利于提高藜麦单株穗重。

产量随着施钾量的增加呈先增长后下降趋势,各处理间均存在差异,其中施钾处理 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 与不施钾处理 T<sub>0</sub>、施钾处理 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 间差异显著。5 个处理藜麦产量从高到低依次为 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub> 和 T<sub>0</sub>,施钾能有效提高藜麦的单位面积产量,各施钾处理较不施钾处理单位面积干重分别高 25.79%、41.55%、102.58%、67.87%。

表 1 不同钾肥用量对藜麦产量及其构成因素的影响

Table 1 Yield of quinoa and constituent factors under different potassium fertilizer dosage

| 处理<br>Treatment | 单株穗粒重<br>Single plant ear<br>grain weight//g | 千粒重<br>1 000-grain<br>weight//g | 单株穗重<br>Spike weight<br>per plant//g | 产量<br>Yield<br>kg/hm <sup>2</sup> |
|-----------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| T <sub>0</sub>  | 32.49±3.49 c                                 | 3.75±0.08 c                     | 69.68±3.36 b                         | 32.18±1.99 d                      |
| T <sub>1</sub>  | 35.56±1.69 bc                                | 3.95±0.21 bc                    | 72.46±2.26 b                         | 40.48±2.26 cd                     |
| T <sub>2</sub>  | 37.90±1.28 ab                                | 4.23±0.10 ab                    | 81.94±2.45 a                         | 45.55±2.71 c                      |
| T <sub>3</sub>  | 41.79±4.06 a                                 | 4.45±0.27 a                     | 87.18±4.10 a                         | 65.19±4.28 a                      |
| T <sub>4</sub>  | 40.57±2.34 ab                                | 4.33±0.17 a                     | 83.14±6.29 a                         | 54.02±0.99 b                      |

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments (P<0.05).

2.4 不同钾肥施用量对藜麦钾肥利用效率的影响 通常钾肥利用率用钾肥农学利用率 (KAE)、钾肥吸收利用率 (KRE)、钾肥生理利用率 (KPE)、钾肥偏生产力 (PFPK) 及钾肥贡献率等来表征。从表 2 可以看出,钾肥农学利用率

(KAE)、钾肥吸收利用率 (KRE) 以及钾肥贡献率均随着钾肥施用量的增加呈先升高后降低趋势;当钾肥施用量大于 80 kg/hm<sup>2</sup>后,以上 3 个指标均呈降低趋势,说明钾肥施用量超出一定限值后,藜麦得不到充分的吸收和利用,必须适当减量

才能提高藜麦钾肥利用效率,施钾处理  $T_3$  的 KPE 和 PFPK 均较高,但该处

理钾肥贡献率、KAE 及 KRE 均较低。

表 2 钾肥施用量对藜麦钾肥利用率的影响

Table 2 Effect of potassium application on potassium utilization rate of quinoa

| 处理<br>Treatment | 钾肥贡献率<br>Potassium fertilizer<br>contribution<br>rate//% | 钾肥农学利用率(KAE)<br>Agricultural utilization<br>rate of potassium<br>fertilizer//kg/kg | 钾肥生理利用率(KPE)<br>Physiological utilization<br>rate of potassium<br>fertilizer//kg/kg | 钾肥吸收利用率(KRE)<br>Potassium fertilizer<br>absorption and<br>utilization rate//% | 钾肥偏生产力(PFPK)<br>Potassium<br>fertilizer partial<br>productivity//kg/kg |
|-----------------|--|--|---|---|--|
| $T_1$           | 20.50 b  | 20.75 b  | 3.31 a  | 6.28 c  | 101.21 a   |
| $T_2$           | 29.34 ab   | 22.27 b  | 1.69 a  | 13.16 a   | 75.91 b  |
| $T_3$           | 50.63 a  | 41.26 a  | 2.95 a  | 14.00 a   | 81.49 b  |
| $T_4$           | 40.43 ab   | 21.84 b  | 1.85 a  | 11.79 b   | 54.02 c  |

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

土壤钾素按照有效性分为速效钾(水溶性钾和交换性钾)、缓效钾(非交换性钾)及相对无效钾(矿物钾),其中速效钾含量<sup>[14-15]</sup>决定土壤中钾素水平。孔庆波等<sup>[16]</sup>连续3年研究滴灌条件下钾肥减量对香蕉产量及钾素平衡的结果表明,土壤中速效钾、缓效钾及全钾均随着施钾量的增加而增大。不同施钾水平对土壤速效钾含量和养分吸收试验中得出,施用钾肥后土壤速效钾含量显著高于不施用钾肥<sup>[17-18]</sup>。但曾德武等<sup>[19]</sup>认为,钾肥施用量对收获后稻田土壤中的磷素、氮素及钾素含量的影响并不明显。该研究表明,与不施用钾肥处理  $T_0$  相比,施用钾肥的处理明显提高了土壤速效钾含量,收获时,施钾处理  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  土壤速效钾分别较不施钾处理  $T_0$  提高 20.45%、65.91%、29.55%、9.09%。土壤中速效钾含量随钾肥施用量的增加而增大,整个生长期,各处理土壤速效钾含量表现为  $T_4>T_3>T_2>T_1>T_0$ 。钾素可以促进作物茎秆伸长、茎秆维管束发育。藜麦出苗后至开花期是藜麦生长的旺盛期,也是钾素的需求高峰期,需要土壤提供大量的钾素,该时段土壤速效钾含量迅速降低,开花后藜麦吸收钾素量明显减少,土壤中的速效钾进行新的平衡转化,使得土壤中的速效钾含量趋于稳定。

钾离子渗透性强,能够快速透过生物膜。施用钾肥能够提高土壤中钾素的含量,使得作物能快速吸收钾离子,当作物体内钾浓度达到一定量时,能够促进植株对土壤中无机氮的吸收,同时也会对磷素的吸收产生影响<sup>[20]</sup>。王锋等<sup>[21]</sup>研究认为,甘薯钾素积累量变化呈“S”型增长曲线。施用钾肥能够显著提高剑麻、棉花及藜麦等作物地上部和根系的吸钾量,同时根系吸氮量、地上部和根系吸磷量均有所提高;但过量施用钾肥会使棉花和藜麦等对氮、磷、钾素的吸收量降低<sup>[22-23]</sup>。该研究得出,藜麦全生育期内氮、磷、钾含量基本符合“S”型增长规律。当钾肥用量从  $0\text{ kg/hm}^2$  增至  $80\text{ kg/hm}^2$  时,随着钾肥施用量的增加,藜麦植株中氮磷钾含量均增加,当钾肥用量高于  $80\text{ kg/hm}^2$  时,藜麦植株中氮、磷、钾含量增幅不大,施钾处理  $T_3$  与  $T_4$  间差异不显著。这说明适宜的钾肥施用量能够促进植株对土壤中氮磷钾养分的吸收利用,也是藜麦生长发育的重要因素。

肥料利用率是反映肥料施用量是否合理的重要表征<sup>[24]</sup>。研究表明,施用钾肥的春大豆钾利用效率极显著低于不施用钾肥处理<sup>[25]</sup>。杨庆飞等<sup>[26]</sup>研究认为,随着钾肥施用量的增加,甘薯 KRE 呈先增大后降低趋势。该研究表明,随着钾肥施用量的增加,藜麦的钾肥贡献率、KAE 和 KER 均呈先增后减趋势,且在钾肥施用量为  $80\text{ kg/hm}^2$  时,KAE 和 KER 均达到最大值,这与上述研究结果一致。甜荞麦钾生理效率随着钾肥施用量的增加而降低,甜荞麦植株营养体中钾素利用效率随着施用钾肥而降低,这表明土壤缺钾时能够有效提高钾素利用效率<sup>[27]</sup>。该研究中,随着施用钾肥量的增加, $T_1$  处理中藜麦的 KPE 和 PFPK 较高, $T_3>T_2>T_4$ ,虽然  $T_1$  处理的 KAE 和 PFPK 较高,但藜麦产量和钾素吸收量显著低于  $T_3$  处理,施钾处理  $T_3$  的单位面积产量较  $T_4$  处理高 20.67%。由此可知,在保证产量的前提下,提高作物钾肥利用效率,避免作物营养体对钾素的奢侈吸收<sup>[28]</sup>。

肥料合理配施是土壤养分实现平衡的途径,对实现资源高效、作物高产和环境保护等具有重要意义<sup>[29-30]</sup>。Jin<sup>[31]</sup>认为,养分投入不平衡是导致化肥利用效率低下和环境问题凸显的根源。李新旺等<sup>[32]</sup>研究认为,长期合理配施化肥能全面提高土壤养分含量和作物产量。研究表明,施用钾肥对促进作物营养器官的生长具有重要作用,并能够提高作物植株对氮、磷、钾等养分的吸收,且向生殖器官进行转移和分配,从而提高作物的产量和品质<sup>[33-34]</sup>。该研究结果表明,不同施用钾肥量处理下,藜麦单株穗粒重、千粒重、单株穗重及单位面积产量均表现为随着钾肥施用量的增加呈先增加后趋于平稳的变化趋势,当施用钾肥量为  $80\text{ kg/hm}^2$  左右时,各产量构成因素指标均最大,当施加量继续增加时,各指标增幅不大并呈略微降低趋势,不同施钾水平藜麦单位面积产量表现为  $T_3>T_4>T_2>T_1>T_0$ 。水稻、三七、甜荞麦等产量在一定的钾肥施用量范围内随施用钾肥量的增加而增加,当钾肥施用量继续增加时,产量呈下降趋势<sup>[17,27,35]</sup>,该研究结果与上述作物的研究结果一致。因此,追求藜麦高产稳产需合理施用钾肥才能充分发挥作物的最大生产潜力。

### 4 结论

施用钾肥能够有效提升土壤供钾能力,促进藜麦植株对

氮素、磷素和钾素吸收;其中  $T_4$  土壤速效钾含量较高,  $T_3$  处理藜麦植株氮磷钾吸收量较高。  $T_3$  处理的钾肥利用率及钾肥贡献率显著高于其他处理;施用钾肥能够显著提高藜麦产量,其中  $T_3$  处理的产量及产量构成因素均优于其他处理。综合藜麦养分吸收、钾肥利用效率及产量等因素,施用  $80 \text{ kg/hm}^2$  钾肥更有助于实现藜麦高产,且能提高钾肥利用效率。

### 参考文献

- [1] 王斌,赵圆峰,晁督,等.早作藜麦养分吸收规律及养分限制因子研究[J].中国土壤与肥料,2020(4):172-177.
- [2] 梁新贝.藜麦的营养价值及应用前景[J].食品界,2018(6):85.
- [3] 王晨静,赵习武,陆国权,等.藜麦特性及开发利用研究进展[J].浙江农林大学学报,2014,31(2):296-301.
- [4] PASKO P, BARTON H, ZAGRODZKI P, et al. Effect of diet supplemented with quinoa seeds on oxidative status in plasma and selected tissues of high fructose-fed rats[J]. Plant foods for human nutrition, 2010, 65(2): 146-151.
- [5] 何巧林,张绍文,李应洪,等.硅钾肥对水稻茎秆性状和抗倒伏能力的影响[J].杂交水稻,2017,32(1):66-73.
- [6] 赵国英,王红光,李东晓,等.灌溉次数和施钾量对冬小麦茎秆形态特征和抗倒性的影响[J].麦类作物学报,2017,37(6):759-768.
- [7] 向达兵,郭凯,雷婷,等.磷钾营养对套作大豆茎秆形态和抗倒性的影响[J].中国油料作物学报,2010,32(3):395-402.
- [8] GHOSH B N, KHOLA O P S, BHATTACHARYA R, et al. Effect of potassium on soil conservation and productivity of maize/cowpea based crop rotations in the north-west Indian Himalayas[J]. Journal of mountain science, 2016, 13(4): 754-762.
- [9] 杨萍,李杰,王田涛,等.不同施钾水平对基质栽培番茄光合生理及产量的影响[C]//中国园艺学会 2017 年论文摘要集.北京:《园艺学报》编辑部,2017:129.
- [10] 杨雪.节水条件下供钾水平对小麦生长发育和养分吸收利用特性的影响[D].保定:河北农业大学,2021.
- [11] 惠薇,王斌,李丽君,等.钾肥对藜麦生长及养分吸收的影响[J].山西农业科学,2021,49(6):734-738.
- [12] 樊小林,廖宗文.控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J].植物营养与肥料学报,1998,4(3):219-223.
- [13] 丁凡,余金龙,刘丽芳,等.不同钾肥用量对万薯 5 号产量的影响[J].农业科技通讯,2012(12):55-57.
- [14] 谭德水,金继运,黄绍文.长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):886-893.
- [15] 陈防,鲁剑巍,万运帆,等.长期施钾对作物增产及土壤钾素含量及形态的影响[J].土壤学报,2000,37(2):233-241.
- [16] 孔庆波,栗方亮,张青,滴灌条件下减量施钾对香蕉产量及土壤钾素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(2):312-321.
- [17] 杜彩艳,杜建磊,包立,等.不同施钾水平对土壤速效钾含量和三七养分吸收及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(6):105-112.
- [18] 康小华.不同施钾水平对马铃薯生长发育、产量、品质及土壤养分的影 响[D].兰州:甘肃农业大学,2012.
- [19] 曾德武,刘强,彭建伟,等.不同稻田土壤钾素丰缺水平下施用钾肥的效应及对土壤肥力的影响[J].湖南农业科学,2012(3):37-40.
- [20] 梁德印,徐美德,王晓琪,等.钾营养对棉花养分吸收和干物质累积的影响[J].中国棉花,1993,20(2):46.
- [21] 王锋,王汝娟,陈晓光,等.不同类型钾肥对甘薯钾素积累和利用率的影响[J].山东农业科学,2009,41(10):77-80.
- [22] 习金根,谭施北,贺春萍,等.不同钾水平对剑麻生长和钾素吸收利用特性的影响[J].热带作物学报,2015,36(2):269-274.
- [23] 高媛,张炎,胡伟,等.不同钾肥用量对长绒棉养分吸收、分配和利用的影响[J].棉花学报,2009,21(1):39-45.
- [24] 闫湘,金继运,何萍,等.提高肥料利用率技术研究进展[J].中国农业科学,2008,41(2):450-459.
- [25] 汪自强,董明远.不同钾水平下春大豆品种的钾利用效率研究[J].大豆科学,1996,15(3):202-207.
- [26] 杨庆飞,许定义,陈浩,等.不同钾肥处理对甘薯养分吸收利用和产量的影响[J].湖南农业科学,2021(5):30-33,37.
- [27] 侯迷红,范富,宋桂云,等.钾肥用量对甜芥麦产量和钾素利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):340-346.
- [28] 王宜伦,苗玉红,谭金芳,等.不同施钾量对砂质潮土冬小麦产量、钾效率及土壤钾素平衡的影响[J].土壤通报,2010,41(1):160-163.
- [29] 马强,刘中良,周桦,等.不同施肥模式对作物-土壤系统养分收支的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):520-524.
- [30] 刘宝勇,刘欣玲,张成,等.水肥一体化模式下不同施肥处理对沙地土壤理化性状及土壤酶活性的影响[J].安徽农业科学,2020,48(9):167-171.
- [31] JIN J Y. Strengthening research and technology transfer to improve fertilizer use in China[C]//RURESH R J, SANCHEZ P A, CALHOUN F. Proceeding of the IFA regional conference for Asia and Pacific. Hong Kong: Special Publication, 1998:21-22.
- [32] 李新旺,门明新,王树涛,等.长期施肥对华北平原潮土作物产量及农田养分平衡的影响[J].草业学报,2009,18(1):9-16.
- [33] 金珂旭,王正银,樊地,等.不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响[J].土壤学报,2014,51(6):1369-1377.
- [34] 常莹,闫伟平,苏宁,等.不同钾肥施用量对玉米抗倒性能及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2014(5):47-52.
- [35] 王强盛,甄宏宏,丁艳锋,等.钾对不同类型水稻氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2009,35(4):704-710.

(上接第 133 页)

- [2] 龚明强,陈国平,杨景,等.几种复合肥对水稻产量及经济效益的影响[J].安徽农业科学,2019,47(13):152-154.
- [3] 郑仁兵,李敏,韩上,等.有机肥替代氮肥的水稻产量效应研究[J].安徽农业科学,2017,45(22):32-33,64.
- [4] 唐海明,程爱武,徐一兰,等.长期有机无机肥配施对双季稻区水稻干物质积累及产量的影响[J].农业现代化研究,2015,36(6):1091-1098.
- [5] 秦建权,冯跃华,叶勇,等.有机无机肥配施对杂交水稻干物质生产、养分吸收及产量形成的影响[J].中国稻米,2017,23(3):59-62.
- [6] 杨胜玲,黄兴成,李渝,等.长期有机无机肥配施对水稻生长、干物质积累及产量的影响[J].浙江农业学报,2022,34(9):1815-1825.
- [7] 沈洋,张秀双,魏晓敏,等.不同施氮肥处理对水稻植株吸磷量的影响[J].北方水稻,2011,41(5):14-16.
- [8] 杜雪.有机和无机氮肥对稻米品质影响的比较[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [9] 张兰,班雁华,龙智翔,等.不同有机肥料对有机稻米品质的影响[J].安徽农业科学,2013,41(22):9287-9289.
- [10] 吴春艳,陈义,许育新,等.长期定位试验中施肥对稻米品质的影响[J].浙江农业学报,2008,20(4):256-260.