

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19502

旱作藜麦养分吸收规律及养分限制因子研究

王 斌^{1,2}, 赵圆峰³, 聂 督^{1,2}, 霍晓兰^{1,2}, 黄高鉴^{1,2}, 张 强^{4*}

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西太原 030031; 3. 山西大学生物工程学院, 山西 太原 030006; 4. 山西农业大学, 山西 太原 030031)

摘 要: 为明确旱作藜麦的养分吸收特征, 开展田间试验研究藜麦对氮、磷、钾养分需求规律及其养分限制因子, 以为旱作藜麦大面积推广和高效生产提供合理的施肥方案。本试验以‘陇藜1号’为材料开展大田肥料缺乏试验, 分析在全施肥区不同生育期藜麦的干物质质量、养分含量及积累量。结果表明: 孕穗期和灌浆期是藜麦整个生育期内干物质积累量最大和日积累量增长最快的两个阶段, 其中孕穗期干物质积累量占干物质总量的48.14%, 且单株干物质日积累量为6.42 g, 灌浆期干物质积累量占干物质总量的27.93%, 且单株干物质日积累量为1.58 g; 藜麦对氮素的吸收量和吸收速率在花期-孕穗期这一阶段达到最大值, 吸收量占吸收总量的29.97%, 吸收速率达到 $7.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 藜麦对磷素吸收量最大的生育期是孕穗-灌浆期, 为 $17.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占总量的32.70%, 但吸收速率却在花期-孕穗期最高, 为 $0.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 孕穗期-灌浆期是藜麦对钾吸收量最高的时期, 为 $103.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占总量的31.09%, 吸收速率在花期-孕穗期最快, 为 $6.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。单位面积氮、磷、钾吸收累积量分别为353.88、53.63、333.62 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其比例为6.60:1:6.22。氮磷钾全施显著提高藜麦的产量, 缺氮、缺磷、缺钾、全施处理与没有施肥处理相比较, 增产幅度为18.2%~118%, 所有施氮的处理比不施氮的处理增产84.2%, 所有施磷的处理比不施磷的处理增产37.4%, 所有施钾的处理比不施钾的处理增产5.7%, 限制藜麦生长及产量的养分因子大小顺序为氮>磷>钾。

关键词: 旱作藜麦; 养分吸收率; 养分累积; 氮磷钾需求规律; 养分限制因子

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd) 原产于南美洲安第斯山区, 主要分布在秘鲁、玻利维亚、厄瓜多尔和智利等地, 在当地栽培已有7 000多年的历史, 是印加土著居民的主要传统食物, 被印第安人称为“粮食之母”^[1-3], 被联合国粮农组织推荐为最完美的全营养食品, 具有耐寒、耐旱、耐贫瘠和耐盐碱等优良特性^[4]。20世纪80年代末我国在西藏地区进行了试种, 到2008年在山西省进行了规模化种植, 目前已成为晋西北高寒地区的旱作特色作物^[5-6]。

已知植物生长必需的三大营养元素为氮、磷、钾, 作物对其吸收利用直接影响到作物的发育、产

量及品质, 因此了解作物吸收养分规律可以有效调控作物的生长发育, 从而提高产量^[7]。研究表明, 不同作物对氮、磷、钾养分的吸收利用规律和养分限制因子也不同^[7-12], 且旱作与水作条件下同一作物对养分的吸收利用也有差异。康小华等^[13], White等^[14]的研究表明施氮对藜麦有明显的增产作用, 提出适宜的施氮量及基追比能提高藜麦植株的各项性状指标、产量和经济效益, 但并未对藜麦养分吸收规律进行深入研究。这些研究主要集中在对藜麦产量指标和植株性状等进行描述, 而关于藜麦在各个生育期的养分吸收、累积等特征鲜有报道, 旱作藜麦方面更是未见报道。

本试验以旱作藜麦为切入点, 依据前期盆栽试验、大田试验结果和本试验区土壤养分测定结果确定施肥量, 设置氮、磷、钾缺乏试验, 确定藜麦的养分限制因子; 在氮、磷、钾全施小区取藜麦不同生育期的植株样, 获得藜麦在不同生育期的干物质及氮、磷、钾养分累积吸收状况, 以为藜麦专用肥的研制及早作农业区藜麦高产优质栽培技术提供理论依据。

收稿日期: 2019-10-26; 录用日期: 2020-05-09

基金项目: 山西省农科院农业科技创新研究课题: 藜麦养分需求规律与施肥技术研究 (YCX2018D2T01); 山西省科技成果转化引导专项: 旱地藜麦减肥增效集成技术示范推广 (201904D131054); 山西省专利推广实施资助专项: 晋西北高寒山区藜麦专用肥示范与推广 (2019043)。

作者简介: 王斌 (1978-), 男, 山西吕梁人, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为植物营养与环境生态。E-mail: flytoyou@163.com。

通讯作者: 张强, E-mail: sxsxnyf@163.com。

1 材料与方方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年在山西省忻州市静乐县娑娑乡李货郎沟村进行, 该区属于北温带高原季风气候, 年降水量 300 ~ 480 mm 之间, 属于干旱半干旱地区, 无霜期 120 d 左右。其地处黄土高原, 成土母质多为黄土及黄土状物, 主要土壤类型为栗褐土与黄绵土, 为石灰性土壤, 土壤 pH 值较高, 碳酸钙

含量丰富。加之气候干旱多风, 地形起伏不平, 水土流失较为严重, 致土壤干旱, 土壤质地粗糙, 粘粒含量低, 保肥性能差。土壤质地以轻壤为主, 有机质含量普遍不高, 氮素不足, 磷素大都缺乏, 氮磷比例失调, 钾素大都有余。土壤呈微碱性, 对于土壤中磷素有固定作用, 使磷素的有效性降低。所以大部分土壤表现磷缺乏。表 1 为播种前土壤基本农化状况, 表 2 为 2017 年试验区藜麦生育期月降雨量和月平均温度。

表 1 试验田播种前土壤基本农化状况

取样层次 (cm)	pH 值	EC (mS · cm ⁻¹)	全氮 (g · kg ⁻¹)	有机质 (g · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)
0 ~ 20	8.64	0.12	0.49	8.31	8.29	215
20 ~ 40	8.34	0.09	0.66	6.62	7.34	196

表 2 2017 年试验区藜麦生育期月降雨量和月平均温度

气象指标	2017 年 6 月	2017 年 7 月	2017 年 8 月	2017 年 9 月	2017 年 10 月
月降雨量 (mm)	49.9	131.5	107.1	153.2	36.2
月平均温度 (°C)	17.4	21.4	19.9	11.8	5.3

1.2 大田试验设计

本试验共设 5 个处理, 即 OPT: N、P、K 配施最优处理 (由以往盆栽试验和大田试验数据确定); OPT-N: 不施氮肥处理, 即在 OPT 的基础上减去氮肥; OPT-P: 不施磷肥处理, 即在 OPT 的基础上减去磷肥; OPT-K: 不施钾肥处理, 即在 OPT 的基础上减去钾肥; CK: 不施肥处理。小区面积 12 m², 各小区随机排列, 3 次重复。所有肥料均是采用春季一次性基施。表 3 为不同处理的具体施肥量。

播种日期为 6 月 2 日, 播种量为 7.5 kg · hm⁻², 密度约为 75 000 株 · hm⁻², 试验藜麦的品种为 ‘陇藜 1 号’, 播种深度为 2 ~ 3 cm, 6 月 11 日出苗, 10 月 15 日收获, 期间没有对藜麦进行灌溉, 全生育期水分来源于土壤水分与降水。

植株样品采集: 各生育期取植株样品, 共 5 次 (发芽期, 幼苗期, 孕穗期, 抽穗开花期, 灌浆成熟期) 分析植株干物质养分含量。产量按各小区收获, 脱粒计量单产。每个小区约 90 株左右, 第 1 次取 15 株样品 (湿重约 110 g, 干重约 27 g), 第 2 次取 8 株 (湿重约 587 g, 干重约 141 g), 第 3 次取 5 株 (湿重约 1 228 g, 干重约 295 g), 第 4

次取 3 株 (湿重约 2 128 g, 干重约 511 g), 第五次取 3 株 (湿重约 3 270 g, 干重约 785 g)。小区采取单打单收, 收获期小区全部计产。

表 3 不同处理的具体施肥量 (kg · hm⁻²)

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
OPT	225	150	75
OPT-N	0	150	75
OPT-P	225	0	75
OPT-K	225	150	0
CK	0	0	0

1.3 测定项目及方法

植株样品全氮用浓 H₂SO₄ 消解, FOSS 8400 型全自动定氮仪凯氏定氮法测定; 全磷、全钾采用 HNO₃-HClO₄ 消解, 普析通用 TU-1901 型紫外分光光度计钒钼黄比色法测定全磷, 6400A 型火焰光度计火焰光度法测定全钾^[15]。

1.4 数据统计分析

本试验数据采用 Excel 2017 和 SPSS 24 软件进行统计与分析。

2 结果与分析

2.1 藜麦养分限制因子研究

从表4中可以看出,藜麦各处理产量均比CK有不同程度的增加,增产幅度从18.2%~118%。OPT增产幅度最大,OPT-N增产幅度最小;所有施氮的处理比不施氮的处理增产84.2%,所有施磷的处理比不施磷的处理增产37.4%,所有施钾的处理比不施钾的处理增产5.7%。OPT与OPT-N、OPT-P处理产量

达到差异显著水平,表明施氮肥、磷肥能显著提高藜麦的产量。以上结果说明在当前试验条件下,影响藜麦产量养分限制因素氮>磷>钾。分析产量构成因素发现,5个处理间的千粒重无显著差异,而OPT处理的藜麦穗粒数显著增加,OPT-N、OPT-P和CK处理的穗粒数显著减少,与OPT处理差异显著,说明提升产量主要取决于穗粒数的差异,缺氮肥和磷肥处理的藜麦穗粒数显著减少,进一步说明氮肥和磷肥主要通过影响藜麦的穗粒数对藜麦产量造成影响。

表4 不同肥料处理对藜麦产量及产量构成因素的影响

处理	穗粒数(个)	千粒重(g)	平均产量($g \cdot m^{-2}$)	相对产量(%)
OPT	4 698 ± 127a	3.86 ± 0.10a	3 63.7 ± 2.7a	100.0
OPT-N	3 436 ± 56b	3.16 ± 0.08a	1 98.0 ± 7.4b	54.4
OPT-P	3 882 ± 114b	3.29 ± 0.02a	2 82.0 ± 9.1c	77.5
OPT-K	4 588 ± 1 595a	3.48 ± 0.09a	3 44.5 ± 3.2a	95.0
CK	3 326 ± 55b	3.23 ± 0.06a	1 67.5 ± 4.7b	46.1

注:同列数据后小写字母不同,表示在0.05水平上处理间差异显著。

2.2 藜麦干物质累积规律

从表5可知,藜麦在不同生育期的干物质累积量差异显著,总体变化趋势为前期缓慢增长,中期急剧增长,后期降低,表现为孕穗期>灌浆期>成熟期>花期>幼苗期;全生育期中孕穗期和灌浆期对单株藜麦干物质累积量的贡献最大,分

别占总量的48.14%和27.93%。处在不同的生育期,单株干物质累积速率也有显著差异,其中花期干物质累积速率较低,日累积量为0.59 g,花期过后的孕穗期干物质累积速率急剧增加,单株日累积量最高6.42 g;全生育期单株日平均累积量为1.66 g。

表5 藜麦植株不同生育期单株干物质累积量及累积速率

项目	幼苗期	幼苗-花期	花期-孕穗期	孕穗期-灌浆期	灌浆期-成熟期	总计
干物质累积量($g \cdot 株^{-1}$)	10.39 ± 0.331c	14.74 ± 0.241c	96.52 ± 4.934a	55.41 ± 5.516b	23.15 ± 7.731c	100.94 ± 9.95
占总量比例(%)	5.21 ± 0.002	7.41 ± 0.003	48.14 ± 0.001	27.93 ± 0.035	11.31 ± 0.036	100
累积速率($g \cdot 株^{-1} \cdot d^{-1}$)	1.039 ± 0.033c	0.59 ± 0.009c	6.42 ± 0.328a	1.58 ± 0.184b	0.58 ± 0.193c	1.66 ± 0.083

注:同行数据后小写字母不同,表示在0.05水平上生育期间差异显著,下同。

2.3 藜麦不同生育期养分吸收及累积特点

从表6可以看出,藜麦植株吸收氮、磷、钾随着生育期的推进逐渐增加,总体上呈前期缓慢的趋势,在花期到孕穗期吸收量和吸收速率显著上升,而后一直到收获保持在一定水平。藜麦在花期到孕穗期氮素的吸收量和吸收速率最大,占吸收总量的29.97%,吸收速率达到 $7.15 kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$,孕穗期、灌浆期和成熟期对氮素的吸收量并无显著差异,但对吸收速率有显著差异;而对于磷素的吸收,在孕穗期到灌浆期的吸收量显著高于孕穗期和成熟期,为17.49

$kg \cdot hm^{-2}$,占总量的32.70%,但吸收速率在花期至孕穗期最高,为 $0.96 kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$;藜麦对钾的吸收量在孕穗期至灌浆期最高,为 $103.24 kg \cdot hm^{-2}$,占总量的31.09%,吸收速率在花期至孕穗期最快,为 $6.30 kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。由表6中可以看出,各养分累积量为氮>钾>磷;单位平均面积氮磷钾吸收累积量分别为353.88、53.63、333.62 $kg \cdot hm^{-2}$,其比例为6.60:1:6.22。从表5可以看出藜麦的干物质累积速率最快的生育期与表6氮、磷、钾养分吸收累积最多的生育期相吻合,即藜麦养分需求最大期。

表 6 藜麦植株不同生育期养分积累量及吸收速率

养分	项目	幼苗期	幼苗-花期	花期-孕穗期	孕穗期-灌浆期	灌浆期-成熟期	总计
N	吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$18.28 \pm 0.39\text{b}$	$23.68 \pm 2.81\text{b}$	$107.12 \pm 16.76\text{a}$	$103.84 \pm 11.31\text{a}$	$100.88 \pm 6.36\text{a}$	353.88 ± 58.22
	占总量比例 (%)	5.27 ± 0.010	6.66 ± 0.003	29.97 ± 0.030	29.31 ± 0.022	28.79 ± 0.037	100
	吸收速率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	$1.83 \pm 0.04\text{bc}$	$0.95 \pm 0.11\text{c}$	$7.15 \pm 1.12\text{a}$	$3.46 \pm 0.38\text{b}$	$2.52 \pm 0.16\text{bc}$	2.94 ± 0.28
P	吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$2.06 \pm 0.098\text{d}$	$4.55 \pm 0.138\text{c}$	$14.39 \pm 1.258\text{b}$	$17.49 \pm 0.294\text{a}$	$15.13 \pm 0.627\text{b}$	53.63 ± 2.30
	占总量比例 (%)	3.85 ± 0.004	8.5 ± 0.003	26.74 ± 0.022	32.7 ± 0.017	28.21 ± 0.004	100
	吸收速率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	$0.21 \pm 0.010\text{d}$	$0.18 \pm 0.006\text{d}$	$0.96 \pm 0.084\text{a}$	$0.58 \pm 0.010\text{b}$	$0.38 \pm 0.016\text{c}$	0.45 ± 0.019
K	吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$15.43 \pm 1.01\text{b}$	$25.12 \pm 2.35\text{b}$	$94.52 \pm 7.09\text{a}$	$103.24 \pm 5.44\text{a}$	$95.32 \pm 9.836\text{a}$	333.62 ± 20.07
	占总量比例 (%)	4.62 ± 0.002	7.57 ± 0.008	28.28 ± 0.004	31.09 ± 0.020	28.44 ± 0.013	100
	吸收速率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	$1.54 \pm 0.101\text{d}$	$1.00 \pm 0.094\text{d}$	$6.30 \pm 0.473\text{a}$	$3.44 \pm 0.181\text{b}$	$2.38 \pm 0.246\text{c}$	2.78 ± 0.167

2.4 藜麦单株全生育期氮、磷、钾吸收积累量的变化规律

由图 1 可看出单株藜麦在全生育期内养分吸收量的趋势变化。藜麦对氮素的吸收积累量从发芽到花期 (10 ~ 25 d) 呈缓慢增加趋势, 到孕穗期 (50 d) 吸收速率加快, 并达到吸收量的峰值, 随后出现下降的趋势, 但保持在一定水平。藜麦对钾素的吸收趋势与氮素基本一致, 幼苗期 (10 d) 吸收缓慢, 从花期到孕穗期 (25 ~ 50 d) 吸收速率显著加快, 到灌浆期 (80 d) 达到最高值, 随后呈下降趋势。藜麦对磷素的吸收趋势与对钾素的趋势更加一致, 在灌浆期 (80 d) 达到最高值, 但由于藜麦对磷素的吸收量相对较少, 因此在图中趋势相对平缓。而结合表 6 可以看出藜麦对氮素和钾素的吸收量都比较大, 而对磷素的吸收量则较少。藜麦对

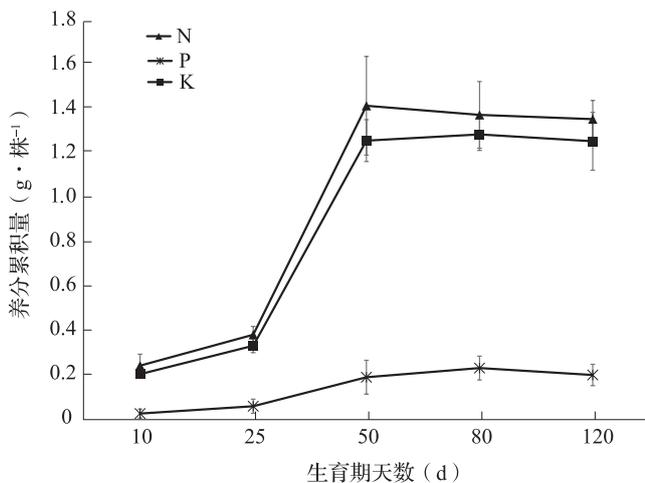


图 1 单株藜麦全生育期内养分吸收规律

磷素吸收量虽然不大, 但由表 4 可知, 缺施磷肥处理藜麦的产量显著下降; 而藜麦植株对钾素的吸收量虽然大, 但缺施钾肥对藜麦产量的影响并无显著差异。从整个生育期来看, 花期、孕穗期到灌浆期 (25 ~ 80 d) 是藜麦养分吸收积累量较大的时期。可见, 在藜麦花期过后开始对其追肥是十分有必要的。

3 讨论

许多研究证明氮、磷、钾是限制作物生长发育的三大主要因子, 氮素对作物生长的影响最大^[7-12]。前人对于其他作物的养分限制因子及养分吸收规律已有不少研究。比如韩彦龙等对红芸豆的养分限制因子及养分吸收、累积和分配特征做了很细致的研究, 证明限制红芸豆生长和产量的主要养分因子为氮和钾^[7]。本试验条件下证明限制藜麦生长的主要因子为氮素, 同时磷素对藜麦的生长和产量也有很大的影响, 缺施钾肥对藜麦的影响均小于氮、磷, 而且对产量没有显著影响, 这可能是供试土壤本身钾素比较充足的原因。本研究表明, 藜麦的干物质质量积累呈先上升后下降的趋势, 这与红芸豆^[7]、大豆^[16-17]和小红豆^[18]的干物质质量积累的趋势基本相同, 不同生育期藜麦的干物质质量累积速率有明显的差异, 花期的单株日累积速率较低, 为 $0.59 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 在花期至孕穗期最高, 为 $6.42 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 而孕穗期到灌浆期的干物质质量累积速率仅次于孕穗期, 为 $1.58 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 其余阶段干物质累积速率较缓, 说明花期、孕穗期到灌浆期是藜麦的干物质质量快速累积的时期, 也正是植株

需要大量养分的时期,在此阶段应保证供应藜麦充足的养分。

通过参考前人的研究^[7, 18]和分析数据得知,作物生物量的累积量与养分的吸收密不可分,作物养分吸收和积累是其生物量累积和产量形成的基础条件,因此也是合理施肥的重要依据。本研究表明藜麦的干物质累积和氮、磷、钾养分累积曲线基本一致,这与宋海星等^[19]对玉米养分吸收和干物质累积的特征和韩彦龙等^[7]对红芸豆养分吸收和干物质累积的特征基本一致,藜麦在幼苗到花期干物质积累速率和养分累积速率要低于其他生育期,这可能是因为藜麦花期较长,各器官都还不成熟所致。孕穗期到灌浆期是藜麦生殖生长和营养生长同时进行的时期,此生育时期干物质积累占全生育期整体的76.07%,孕穗期和灌浆期对氮、磷、钾养分吸收速率和养分积累分别占总吸收量的59.28%、59.44%和59.37%;此外,藜麦在成熟期的养分需求也很高,与孕穗期和灌浆期保持相当水平,分别占吸收总量的28.29%、28.21%和28.44%。依据藜麦干物质积累和养分吸收特点,在孕穗期到灌浆期(50~80 d)适当合理的追施氮肥和磷肥,保证土壤供应充足养分,满足藜麦对干物质质量累积和养分吸收的需求,可对实现藜麦壮苗及其产量提供保障。本试验只研究了平衡施肥条件下藜麦养分吸收状况,而藜麦的最佳复合肥施用量以及不同施肥情况下藜麦养分吸收状况,有待进一步的试验去研究。

4 结论

氮、磷和钾配施可显著提高藜麦产量,缺钾素处理与全施肥处理藜麦产量无显著差异,缺氮和缺磷处理对藜麦产量影响显著,各处理间藜麦千粒重无显著差异,主要是通过增加藜麦穗粒数对其产量产生影响^[20-21]。影响藜麦产量的养分限制因子氮>磷>钾。

藜麦的干物质积累速率在幼苗-花期最低,在此之后便进入急剧增长阶段,孕穗期是藜麦干物质积累的主要阶段,占藜麦植株总干重的48.14%,灌浆期的干物质质量积累仅次于孕穗期,占植株总干重的27.93%。

全生育期藜麦对氮素的吸收累积量从发芽到花期呈缓慢增加趋势,在孕穗期急剧加快并达到峰值,之后呈下降趋势;藜麦对磷素和钾素的吸收前期也是呈现缓慢趋势,孕穗期加快速率,在灌浆期达到峰值,到灌浆成熟期呈现下降趋势。其养分累

积量为氮>钾>磷。从藜麦的整个生育期来看,其花期到孕穗期再到灌浆期是养分吸收累积量较大的时期,因此,在此期间应满足藜麦对养分的需求。

由本文可知,在雨养的状态下不同施肥处理对藜麦产量影响不同,本研究的结论对藜麦在旱作农业区的推广有一定的参考价值。目前提倡减肥减氮和提质增效的理念^[22],因此对藜麦专用肥中氮的配比尤为重要,下一步将着重细化研究藜麦对氮素的需求规律,为旱作藜麦种植推广提供更合理的施肥措施。

参考文献:

- [1] 王黎明,马宁,李颂,等. 藜麦的营养价值及其应用前景[J]. 食品工业科技, 2014, 35(1): 381-384, 389.
- [2] 肖正春,张广伦. 藜麦及其资源开发利用[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(2): 62-66.
- [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] 任贵兴,杨修仕,么杨. 中国藜麦产业现状[J]. 作物杂志, 2015, (5): 1-5.
- [6] 贾璟琪,化延斌,李富忠. 静乐县藜麦产业发展中存在的问题及对策研究[J]. 山西农业科学, 2017, 45(7): 1181-1183, 1192.
- [7] 韩彦龙,晋凡生,郑普山,等. 红芸豆养分限制因子及养分吸收、积累和分配特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 902-909.
- [8] 王宜伦,李潮海,何萍,等. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 559-566.
- [9] Nyiraneza J, N' Dayegamiye A, Chantigny M H, et al. Variations in corn yield and nitrogen uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 317-327.
- [10] 赵瑞芬,陈明昌,张强,等. 山西省褐土土壤养分限制因子研究[J]. 山西农业科学, 2003, 31(3): 35-39.
- [11] 戴良香,张电学,郝兰春,等. 高产粮区冬小麦-夏玉米轮作条件下土壤养分限制因子与施肥研究[J]. 河北职业技术学院学报, 2001, 15(2): 5-8.
- [12] 李玉影,刘双全,姬景红,等. 黑龙江省不同农业生态区大豆平衡施肥效果研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(6): 1029-1038.
- [13] 康小华,沈宝云,王海龙,等. 不同氮肥施用量及基追比对藜麦产量及经济性状的影响[J]. 农学学报, 2017, 7(12): 34-37.

- [14] White P, Alvistur E, Diaz C, et al. Nutrient content and protein quality of quinoa and cañihua, edible seed products of the andes mountains [J]. *Agricultural and Food Chemistry*, 1955, 3 (6): 351-355.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 毕远林. 大豆干物质积累与氮、磷、钾吸收与分配的研究[J]. *大豆科学*, 1999, 18 (4): 331-335.
- [17] 刘克礼, 高聚林, 王立刚. 大豆对氮、磷、钾的平衡吸收动态的研究[J]. *中国油料作物学报*, 2004, 26 (1): 51-54.
- [18] 赵婷婷, 冯光明, 刘树欣. 红小豆氮磷钾积累与分配规律的研究[J]. *河北农业大学学报*, 2000, 23 (3): 16-19.
- [19] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. *中国农业科学*, 2003, 36 (1): 71-76.
- [20] 闫士朋, 冯焕琴, 杨宏伟, 等. 氮肥不同施用量及基追比对藜麦根系生理及同化物分配的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (4): 105-115.
- [21] 哈丽哈什·依巴提, 张炎, 李青军, 等. 施肥对棉花养分吸收、分配、利用和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (2): 61-66.
- [22] 安江勇, 肖厚军, 秦松, 等. 不同施肥量对贵州高产玉米养分吸收、生物性状、产量及品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (3): 73-79.

Nutrient absorption rule and nutrient restrictive factors of quinoa in dryland

WANG Bin^{1, 2}, ZHAO Yuan-feng³, NIE Du^{1, 2}, HUO Xiao-lan^{1, 2}, HUANG Gao-jian^{1, 2}, ZHANG Qiang^{4*}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu Shanxi 030801; 2. Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan Shanxi 030031; 3. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006; 4. Shanxi Agricultural University, Taiyuan Shanxi 030031)

Abstract: The field experiment was conducted to study the nutrient requirements of nitrogen, phosphorus and potassium in quinoa and its nutrient limiting factors, in order to provide a reasonable fertilization scheme for large-scale promotion and efficient production of quinoa. In this experiment, 'long li 1' was used as a material to carry out the field fertilizer deficiency test, and the dry matter quality, nutrient content and accumulation amount of quinoa in different growth stages in the whole fertilization area were analyzed. The results showed that the booting stage and the filling stage were the two stages in which quinoa had the largest dry matter accumulation and the fastest daily accumulation during the whole growth period. The dry matter accumulation at the booting stage accounted for 48.14% of the total dry matter, and the daily accumulation of dry matter was 6.42 g, and the accumulation of dry matter in the filling period accounted for 27.93% of the total dry matter, and the daily accumulation of dry matter was 1.58 g. The amount and rate of nitrogen absorption of quinoa reached peak value during the flowering-booting stage, the absorption amount accounted for 29.97% of the total absorption, and the absorption rate reached $7.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. The maximum phosphorus absorption period of quinoa was at the booting-filling stage, which was $17.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 32.70% of the total, but the absorption rate was the highest during the flowering-booting stage, which was $0.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. The booting-filling period was the period in which quinoa had the highest potassium absorption, which was $103.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 31.09% of the total, and the absorption rate was the fastest at the flowering-booting stage, which was $6.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. The cumulative amounts of nitrogen, phosphorus and potassium absorption per unit area were 353.88, 53.63 and $333.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the ratio of which was 6.60 : 1 : 6.22. Total application of N, P, and K significantly increased the yield of quinoa. Compared with the treatment without fertilizer, the treatments of nitrogen deficiency, phosphorus deficiency, potassium deficiency, and total application increased the yield from 18.2% to 118%. The yield of all treatments with nitrogen increased by 84.2% compared with the treatments without nitrogen. All treatments with phosphorus increased by 37.4% compared with the treatment without phosphorus. All treatments with potassium increased by 5.7% compared to the treatment without potassium. The order of nutrient factors that restricted the growth and yield of quinoa was nitrogen>phosphorus>potassium.

Key words: rainfed quinoa; nutrient absorption rate; nutrient accumulation; NPK demand law; nutrient restrictive