

# 藜麦生长发育特性及养分吸收分配动态变化规律研究

和桂青 李兆光 袁文珏 和琼姬 杨文高 李燕 王蕊 叶磊 侯志江

(云南省农业科学院高山经济植物研究所, 674100, 云南丽江)

**摘要** 于不同生长期对藜麦进行田间采样, 测定不同生育阶段主要农艺性状、干物质积累和营养元素含量的变化。结果表明, 藜麦干物质积累呈现“S”形曲线, 生长 60~90 d 是干物质积累的关键期。不同生长期藜麦各部位(根、茎、叶和穗)的干物质分配比例和养分吸收率存在显著差异, 其中, 氮、磷和钾的吸收量在生长 60~80 d 达到高峰, 钾的吸收量最大, 氮次之, 磷最少, 吸收比为 4.88:1.00:11.00。藜麦的营养元素分配随着生长期的变化表现出动态变化规律, 生长前期养分主要集中在叶和茎, 后期更多向穗部转移。还发现藜麦的农艺性状与干物质积累量存在显著相关性, 根重、茎重和穗重与株高、茎粗、叶长等主要农艺性状呈显著正相关。

**关键词** 藜麦; 农艺性状; 干物质积累; 养分吸收; 动态变化

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.) 是苋科 (Amaranthaceae) 藜属 (*Chenopodium*) 植物, 起源于南美洲安第斯山脉, 原产于秘鲁和玻利维亚的高原地区。作为当地传统主食, 藜麦不仅富含优质蛋白质和所有必需氨基酸 (其中赖氨酸为许多谷物中的首要限制性氨基酸<sup>[1]</sup>), 还含有丰富的钙、镁、铁、铜和锌等矿质元素及 B<sub>2</sub>、B<sub>6</sub> 和叶酸等维生素<sup>[2]</sup>。藜麦籽粒中还含有丰富的活性物质 (如多酚类化合物), 具有抗氧化和抗炎作用<sup>[3]</sup>, 因此, 其被联合国粮食及农业组织 (FAO) 列为“21 世纪保证粮食安全主要作物之一”, 并被誉为“超级粮食”<sup>[4]</sup>。藜麦具有极强的环境适应能力, 能够耐盐碱<sup>[5]</sup>、干旱<sup>[6]</sup>和寒冷<sup>[7]</sup>等多种恶劣条件, 在海拔 0~4000 m 范围内均有分布<sup>[8]</sup>。藜麦因其丰富的营养价值、极强的抗逆性及环境适应性, 在气候变化和环境压力加剧的背景下, 已成为全球范围广泛关注的农作物, 有望在全球粮食安全和可持续农业发展中发挥关键作用<sup>[9-13]</sup>。随着国际市场需求的不断增长, 藜麦的引种栽培面积逐年扩大, 现已成功在澳大利亚、印度、中国、美国、加拿大、英国、希腊、丹麦和意大利等多个国家和地区推广种植<sup>[14]</sup>。在我国, 藜麦已在西藏、山西、甘肃、青海、内蒙古、云南、新疆、河北和宁夏等地成功引种栽培<sup>[15-17]</sup>。2012 年以来, 已在云南丽江、香格里拉、昆明和大理等海拔 1500~3400 m 的地区大力推广种植, 累计

面积达到 1000 hm<sup>2</sup> 左右<sup>[18]</sup>。研究<sup>[19]</sup>表明, 在海拔高于 2400 m 的滇西北高海拔冷凉地区, 藜麦的产量明显高于滇中和滇西等海拔较低地区。此外, 随着海拔的升高, 藜麦中氨基酸等营养成分总含量也呈增加趋势<sup>[20]</sup>。因此, 云南高海拔地区被认为是藜麦的主要适宜种植区。

藜麦在我国的种植历史较短<sup>[21-22]</sup>, 前人的研究主要集中在不同地区藜麦种质资源的农艺性状和营养成分分析等方面。宋娇等<sup>[23]</sup>对青海 6 个藜麦品种 (系) 的农艺性状进行相关性分析, 发现单株产量与株高、茎秆长、有效穗数和千粒重呈正相关。王思宇等<sup>[24]</sup>对内蒙古 71 份藜麦品种资源的农艺性状及营养品质分析, 证实多个农艺性状间存在显著相关性。魏玉明等<sup>[25]</sup>对藜麦不同生育期的营养物质积累与分配规律进行了研究。王斌等<sup>[26]</sup>分析不同生育期山西旱作藜麦干物质量、养分含量及积累量, 并探讨氮、磷和钾养分需求规律及其养分限制因子。这些研究表明, 藜麦单株产量与农艺性状紧密相关, 且在不同生长期藜麦对氮、磷和钾的需求和吸收具有显著差异<sup>[27]</sup>。然而, 目前关于藜麦生育期干物质积累动态和养分吸收规律的研究相对较少, 已有研究多集中于特定区域的生长期或单一因素上, 缺乏对藜麦全生育期内植株不同部位动态变化规律的系统性研究。因此, 本研究通过对藜麦在不同生育阶段主要农艺性状、干物质积累量及氮、磷、

作者简介: 和桂青, 研究方向为经济植物资源与利用, E-mail: heguiqing2013@126.com

侯志江为通信作者, 研究方向为经济植物资源与利用, E-mail: houzhijiang123@126.com

基金项目: 云南省重大科技专项与重点研发计划 (202202AE090020); 云南省科技厅基础研究计划 (202101BC070003-51); 云南省财政厅专项 (云财农[2024]8 号)

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-02-17; 网络出版日期: 2025-04-23

钾养分吸收和分配动态变化规律进行系统分析，全面揭示藜麦在云南高海拔地区的生长特性及其对养分的动态需求。通过研究藜麦生长发育过程中的资源利用特征和生产潜力，为其高效栽培管理和优化施肥策略提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于云南省农业科学院高山经济植物研究所美自科研基地（云南省丽江市古城区开南街道良美社区美自村）（26.815° N, 100.300° E）进行，该地平均海拔 2328 m，年均降水量 972 mm，年均气温 12.8 °C，最高气温 32.5 °C，最低气温 -7.0 °C，全年日照时数大于 2500 h，无霜期 110 d。试验地土壤为红壤土，pH 6.9，土壤含有机质 49.10 g/kg、全氮 2.57 g/kg、有效磷 48.70 mg/kg 和全钾 10.0 g/kg。

### 1.2 试验设计

供试藜麦（白藜）由云南省农业科学院高山经济植物研究所提供，前茬为薰衣草。试验于 2023 年 6 月 30 日播种，于 11 月 8 日成熟，全生长期 131 d。小区总面积为 0.6 hm<sup>2</sup>，复合肥（N:P:K=15:15:15）作为底肥，施肥量 375 kg/hm<sup>2</sup>。整地后采用宽厢多行覆膜塘播，厢宽 1 m，株距 35 cm，于 6~8 片真叶时间苗，每塘留苗 2~3 株。其余田间管理按照常规进行。

### 1.3 测定项目与方法

定期观察藜麦各物候期的生长动态，由于藜麦前期生长缓慢，生物量积累较少，因此从出苗后 50 d 开始每隔 10 d 随机选取生长势良好且无病害的 10 株藜麦进行农艺性状调查及取样，将整株按根、茎、叶和穗 4 个部位分类，称量鲜重后，烘干称量干重（将各部分样品置于烘箱 105 °C 下杀青 30 min，65 °C 下烘 48 h 至恒重），再将样品进行粉碎和研磨过筛，测定不同时期各部位氮、磷和钾含量：采用凯氏定氮法测定全氮（N）含量；采用浓硫酸—高氯酸消解—钼锑抗比色法测定全磷（P）含量；采用火焰光度法测定全钾（K）含量<sup>[28]</sup>。计算公式如下：

全株日生长量（g/株）=（当次取样全株干重—上次取样全株干重）/10；

阶段积累率（%）=[（当次取样全株干重—上次

取样全株干重）/收获期全株干重]×100；

分配率（%）=（某时期某部位的干重/该时期全株干重）×100；

各元素积累量（mg/株）=某时期藜麦某部位（或全株）的某元素含量×该时期藜麦某部位（或全株）干重。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析，采用 Origin 8.5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 藜麦不同生育期农艺性状与根、茎、叶、穗干物质积累量的相关性分析

表 1 结果表明，根重与主根粗、叶长、叶宽、侧根数、茎粗、株高、分枝数和分枝长呈极显著正相关，相关系数分别为 0.630、0.571、0.543、0.533、0.529、0.498、0.474 和 0.418，而与第一有效穗位呈极显著负相关；茎重与分枝长、叶长、叶宽、茎粗、株高、主根粗、侧根数和分枝数呈极显著正相关，相关系数分别为 0.836、0.710、0.659、0.646、0.624、0.621、0.477 和 0.296；叶重与主根粗呈极显著正相关，相关系数为 0.354，与分枝长呈极显著负相关，相关系数为 -0.272；穗重与叶长、分枝长、叶宽、茎粗、株高、主根粗和主根长呈极显著正相关，相关系数分别为 0.734、0.678、0.672、0.453、0.366、0.320 和 0.314，与侧根数呈显著正相关，相关系数为 0.284。根、茎、叶和穗干物质间的相关性分析结果表明，根重与茎重呈极显著正相关，相关系数为 0.609，与穗重呈显著正相关，相关系数为 0.230；穗重与茎重呈极显著正相关，相关系数为 0.785，穗重与叶重呈极显著负相关，相关系数为 -0.602。

### 2.2 藜麦干物质积累量及分配特征

由表 2 和图 1 可以看出，藜麦的干物质积累规律呈现平稳—快—平稳（“S”形）的趋势，全株日生长量呈现平稳—快—慢—快—慢的趋势，整个生长过程中有 2 个生长高峰，分别为生长天数 60~70 d 和 80~90 d。60~70 d 时藜麦全株干物质积累最快，日生长量最高，为 4.01 g/株，其阶段积累率为 24.06%；其次为 80~90 d 时，藜麦干物质占总积累量的 12.61%，日生长量为 2.10 g/株。100~120 d 时，藜麦进入收获期，全株日增长量及干物

表 1 藜麦不同生育期农艺性状与根、茎、叶、穗干物质积累量的相关性分析  
Table 1 Correlation analysis of agronomic traits with dry matter accumulation in roots, stems, leaves, and panicles of *C. quinoa* at different growth stages

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	主根长 Main root length	主根粗 Main root diameter	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	分枝数 Number of branches	分枝长 Branch length	第一有效穗位 First effective panicle height	侧根数 Number of lateral roots	根重 Root weight	茎重 Stem weight	叶重 Leaf weight
茎粗 Stem diameter	0.218												
主根长 Main root length	0.206	0.155											
主根粗 Main root diameter	0.360**	0.610**	0.246*										
叶长 Leaf length	0.859**	0.054	0.106	0.396*									
叶宽 Leaf width	0.795**	0.094	0.152	0.396*	0.947**								
分枝数 Number of branches	0.537**	0.264*	0.034	0.362**	0.730**	0.806**							
分枝长 Branch length	0.648**	0.468**	0.213	0.423**	0.702**	0.680**	0.285*						
第一有效穗位 First effective panicle height	0.013	-0.211	-0.024	-0.234*	-0.416**	-0.514**	-0.272*	-0.203					
侧根数 Number of lateral roots	0.322**	0.423**	0.115	0.482**	0.201	0.226	0.252*	0.325**	-0.106				
根重 Root weight	0.498**	0.529**	0.137	0.630**	0.571**	0.543**	0.474**	0.418**	-0.291**	0.533**			
茎重 Stem weight	0.624**	0.646**	0.206	0.621**	0.710**	0.659**	0.296**	0.836**	-0.218	0.477**	0.609**		
叶重 Leaf weight	-0.224	0.171	-0.014	0.354**	-0.113	-0.079	0.018	-0.272*	-0.117	0.165	0.271*	-0.142	
穗重 Panicle weight	0.366**	0.453**	0.314**	0.320**	0.734**	0.672**	-0.040	0.678**	-0.098	0.284*	0.230*	0.785**	-0.602**

“\*\*\*”和“\*\*”分别表示在  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  水平达极显著和显著相关。

“\*\*\*” and “\*\*” indicate extremely significant correlation and significant correlation at  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$  levels, respectively.

质积累速率均逐渐下降。

茎和穗的干物质积累规律与全株干物质积累规律相似(表 2 和图 1), 均呈“S”形的趋势。茎干物质积累量在生长 60~70 d 时最高, 与全株干物质积累规律一致, 但在生长 90~100 d 时, 其干物

质积累量呈下降趋势。在生长 80~100 d 时, 穗进入灌浆期, 干物质积累量与日增长量最高。根干物质积累量随生长天数呈先上升后下降趋势, 80 d 时积累量最高, 为 22.84 g/株。而叶干物质积累量随生长天数的增加呈下降趋势。

表 2 藜麦单株和不同部位干物质积累动态  
Table 2 Dynamics of dry matter accumulation in single *C. quinoa* plant and different plant parts

生长 天数 Growth days (d)	干物质积累量 (g/株) Dry matter accumulation (g/plant)					全株日生长量 (g/株) Daily growth of whole plant (g/plant)	阶段积累率 Stage accumulation rate (%)	分配率 Distribution rate (%)			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	全株 Whole plant			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle
50	8.05±0.76	24.46±2.21	16.27±1.52	5.29±0.87	54.06±4.80	1.08	32.47	14.88	45.25	30.09	9.78
60	10.94±1.03	29.15±2.61	13.52±1.44	8.95±0.81	62.56±5.53	0.85	5.11	17.49	46.59	21.60	14.31
70	18.25±3.91	53.10±6.48	15.13±2.11	16.13±1.29	102.62±12.79	4.01	24.06	17.79	51.74	14.75	15.72
80	22.84±3.07	57.84±6.21	11.77±1.82	20.52±2.50	112.98±12.12	1.04	6.22	20.22	51.20	10.42	18.17
90	19.53±4.43	72.38±3.96	10.96±1.12	31.10±1.26	133.98±10.06	2.10	12.61	14.58	54.02	8.18	23.21
100	18.10±3.15	67.13±3.37	3.84±1.09	56.70±3.94	145.76±9.33	1.18	7.08	12.42	46.05	2.63	38.90
110	12.85±1.57	75.76±8.47	2.45±0.71	67.33±7.11	157.65±16.84	1.19	7.14	8.15	48.06	1.55	42.71
120	14.58±2.35	78.73±9.60	—	73.18±10.20	166.48±20.86	0.88	5.30	8.76	47.29	—	43.96

不同生长期各部位干物质分配率呈现不同变化(表 2)。根干物质分配率与其积累量规律一致, 均随生长天数呈先上升后下降的趋势, 以生长天数 80 d 的分配率最高, 为 20.22%。茎干物质分配率

与根分配率规律一致, 均随生长天数呈先上升后下降趋势, 生长天数 90 d 时分配率最高, 为 54.02%。叶干物质分配率随生长天数呈下降趋势, 生长天数 50 d 时分配率最高, 为 30.09%。而穗干物质分配

率与叶表现相反，随生长天数呈上升趋势，生长天数 120 d 时分配率最高，为 43.96%。

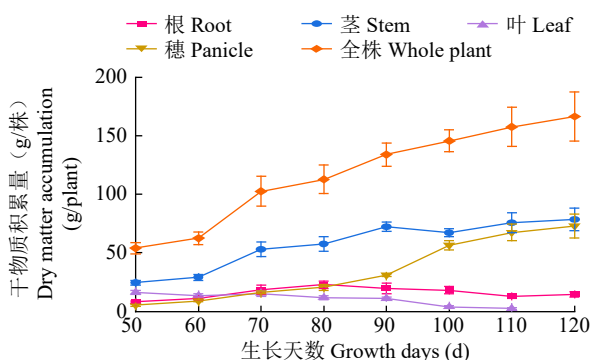


图 1 不同生育期藜麦单株和不同部位干物质积累动态  
Fig.1 Dynamics of dry matter accumulation in different parts of a single *C. quinoa* plant at various growth stages

### 2.3 藜麦养分吸收分配动态变化规律

2.3.1 植株氮、磷、钾积累特征 由图 2 可以看出，氮的积累量呈慢—快—慢趋势，其中生长 60~80 d 为快速增长期，在 80 d 时达到最高。磷的积累量在生长 50~70 d 呈缓慢—快速增加的趋势，在 70 d 时达到最高值，生长 80 d 以后在吸收量 400 mg/株水平下呈略增加—略下降的平缓趋势。钾的积累量呈下降—快速增长—略下降—上升—快速下降的趋势，因此在整个生育期钾的下降期出现在 60、90 和 100 d 时，快速吸收期与氮积累量一致，为生长 60~80 d 时；藜麦对钾的吸收有 2 个高峰期，分别出现在生长 80 和 100 d 时。藜麦植株对氮、磷和钾的总吸收量大小为钾>氮>磷，其吸收比为 4.88:1.00:11.00；藜麦各生长期对氮、磷和钾的分配率大小也为钾>氮>磷。藜麦植株对氮、磷和钾的吸收率在生长 60~70 d 时与植株干物质的积累率均最高，为快速增长期，在该时期藜麦随着干物质积累的快速增加，其对氮、磷和钾的吸收量也快速

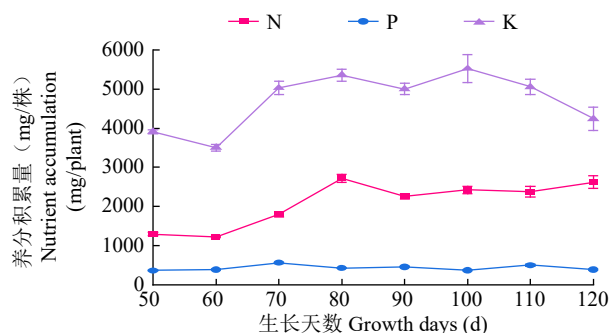


图 2 不同生育期藜麦 N、P 和 K 积累动态  
Fig.2 Dynamics of N, P, and K accumulation in *C. quinoa* at different growth stages

增加。

2.3.2 不同部位氮、磷、钾积累分配特征 根、茎、叶和穗的氮积累量表现为穗>茎>叶>根，不同生长期各部位氮的积累量变化规律均不同。从图 3 可以看出，根对氮的积累量在整个生育期变化频率不高，呈先增加后降低的趋势，以生长 70 d 时最高；茎对氮的积累量呈先增后减的趋势，以生长 80 d 时的积累量最高，为 1451.83 mg/株，此时茎中氮的分配率较其他部位的高，为 53.35%；叶对氮的积累量呈逐渐减少的趋势，以生长 50 d 时的积累量最高，为 601.81 mg/株，此时叶中氮的分配率较其他部位的高，为 46.53%；穗对氮的积累量则呈慢—快—慢—快的增长趋势，以生长 80~100 d 的增长速度最快。藜麦植株随生长天数的增加其不同部位的氮分配率也呈不同的变化，在生长 60 d 前，藜麦植株以叶的氮分配率最高，生长 70~80 d 以茎的氮分配率最高，生长 90 d 后以穗的氮分配率最高。

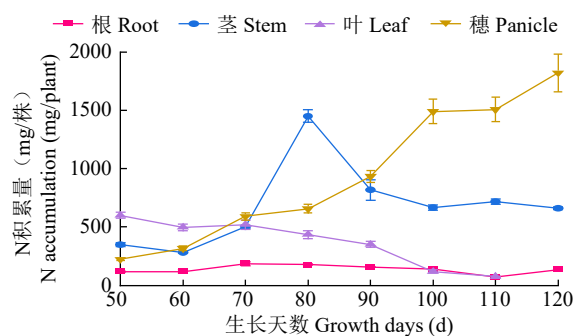


图 3 不同生育期藜麦根、茎、叶和穗的 N 积累动态  
Fig.3 Dynamics of N accumulation in roots, stems, leaves, and panicles of *C. quinoa* at different growth stages

根、茎、叶、穗的磷积累量表现为茎>穗>叶>根，不同生长期各部位对磷的积累量变化规律均不同。从图 4 可以看出，根对磷的积累量在整个生育期变化有 2 个高峰期，为生长 70 和 90 d 时，90 d 以后呈下降的趋势。茎对磷的积累量呈快增—平缓—快降—增—降的趋势，有 2 个高峰期，分别为生长 70 和 110 d 时，生长 100 d 时的磷积累量最低。叶对磷的积累量呈下降—升高—下降的趋势，有 2 个高峰期，为生长 50 和 70 d 时，70 d 以后呈下降的趋势。穗对磷的积累量在生长 110 d 以前呈快—慢—快的增长趋势，在生长 70 和 110 d 时有 2 个高峰值，对应 2 个快速生长期分别为 50~70 d 和 90~110 d；生长 110 d 以后进入成熟期，穗的磷积累量降低。藜麦植株随生长天数的增加其不同部位

的氮分配率也呈不同变化,在生长 90 d 以前,植株以茎的磷分配率最高,100 d 以后以穗的磷分配率最高。

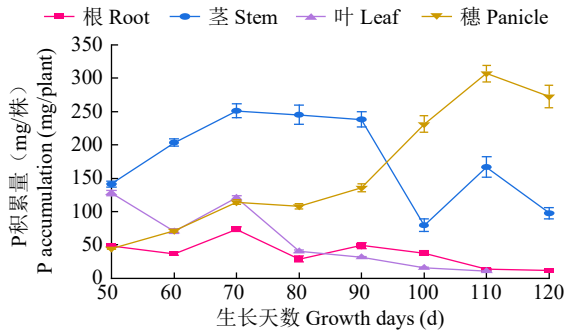


图4 不同生育期藜麦根、茎、叶和穗的 P 积累动态  
Fig.4 Dynamics of P accumulation in roots, stems, leaves, and panicles of *C. quinoa* at different growth stages

根、茎、叶和穗的钾积累量与磷积累量表现一致,为茎>穗>叶>根,不同生长期各部位对钾的积累量变化规律均不同。从图 5 可以看出,根中钾的积累量在生长 80 d 时呈 1 个高峰,其积累量为 1201.49 mg/株,其余各时期的积累量在 235.08~429.75 mg/株,其变异系数较小,在生长 50~70 d 呈缓慢增加,在生长 50~70 d 呈缓慢降低,变化幅度不大。茎中钾的积累量在整个生育期变化幅度较大,呈降—增—降—增的趋势,在生长 70 和 100 d 时形成 2 个高峰值,其积累量分别为 2877.91 和 2470.27 mg/株。叶中钾的积累量随着生育期的增加呈下降的趋势,以生长 90~100 d 的下降速率最快。穗中钾的积累量在生长 100 d 以前随生长天数的增加而增加,其中以生长 80~100 d 时的增加速率最快,整个生长期的钾积累量在生长 100 d 时达最高值(2432.43 mg/株);穗中钾的积累量在生长 100 d 以后随生长天数的增加而降低。植株随生长天数的增加其不同部位的钾分配率也呈不同的变

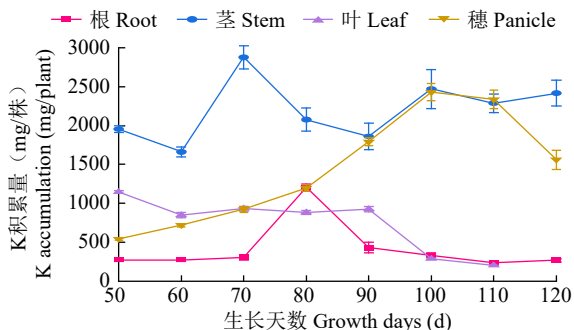


图5 不同生育期藜麦根、茎、叶和穗的 K 积累动态  
Fig.5 Dynamics of K accumulation in roots, stems, leaves, and panicles of *C. quinoa* at different growth stages

化,在生长 100 d 以前,植株以茎的钾分配率最高,生长 100~110 d 以穗的钾分配率最高,生长 120 d 后以茎的钾分配率最高。

### 3 讨论

#### 3.1 藜麦农艺性状与干物质积累量的相关性

农艺性状是农业生产中为品种选择、种植管理及产量评估而观察和测量的各种特征,其在作物育种、种质资源评价和农业生产管理中起着重要作用<sup>[29-30]</sup>。Bhargava 等<sup>[14]</sup>的研究表明花序长度与产量的相关性最大,其次是干重和株高。王艳青等<sup>[31]</sup>对 135 份国外引种藜麦种质资源进行分析,指出单株产量与千粒重呈极显著正相关。黄杰等<sup>[32]</sup>对 38 份藜麦种质的研究表明,单株产量与冠幅呈显著正相关。王艳青等<sup>[18]</sup>进一步对 10 个藜麦新品系的单株产量与 7 个主要农艺性状进行分析,发现单株产量与株高、茎粗呈极显著正偏相关。马丽娜等<sup>[33]</sup>对云南元谋地区 22 份藜麦种质的农艺性状进行分析表明,产量与主穗长呈极显著正相关。本研究结果与前人<sup>[31-33]</sup>基本一致,在此基础上进一步研究不同生长期藜麦的农艺性状与干物质积累量间的相关性,结果表明,藜麦在不同生长期的农艺性状与干物质积累量之间存在显著相关性。根重、茎重和穗重分别与藜麦的主根粗、叶长、叶宽、茎粗、株高、侧根数、分枝数和分枝长 8 个农艺性状呈显著正相关。这些结果均表明株高、茎粗和穗长等农艺性状的增加可以显著提高藜麦单株产量。因此,在藜麦的生长发育阶段,通过科学栽培管理和优化施肥策略来强化关键农艺性状,可以有效提高藜麦产量和品质。邓妍等<sup>[34]</sup>的研究进一步指出,通过增加藜麦的株高、分枝数、茎秆直径和茎秆强度,可有效降低倒伏率,从而显著提高产量。本研究还发现,茎重与根重、穗重均呈极显著正相关,而第一有效穗位与根重呈极显著负相关。这表明根系越发达,第一有效穗位越低,植株越早分枝,分枝数也相对较多,这进一步说明株高、茎粗和分枝数是提高藜麦产量的重要农艺性状。

#### 3.2 藜麦干物质积累量及分配规律

干物质的积累和分配是衡量作物生长状况、产量及营养价值的重要指标,通过分析干物质的积累动态和分配特征,可以评估不同管理措施和环境条件对作物生长的影响<sup>[29,35]</sup>。干物质的积累和分配不

仅直接影响作物的产量和品质，还对作物的抗逆性和资源利用效率产生重要作用<sup>[36]</sup>。藜麦在不同生长期的干物质积累量呈“S”形变化规律，整个生长过程分为平稳期、快速增长期和再平稳期，全株干物质积累量在采收期达到最高值，这与其他作物如马铃薯<sup>[37]</sup>、玉米<sup>[38]</sup>、苘蓝<sup>[39]</sup>和陆地棉<sup>[40]</sup>等的干物质积累规律类似，均遵循 Logistic 生长曲线。这些作物在生育期内的干物质积累量均随生长进程不断增加。魏玉明等<sup>[25]</sup>研究了藜麦叶片、茎秆、果穗、籽粒和根系的干物质积累规律，发现叶片和根系在营养生长期干物质积累量迅速上升，而果穗及籽粒在生殖生长期干物质积累量达到最大，与本研究结果一致。本研究中藜麦根、茎、叶和穗在不同生长期的干物质积累量及速率各不相同，根、茎和叶在早期和中期积累较多，而穗则在生长中后期的干物质积累较快。藜麦茎的干物质的积累量在生长 60~70 d 时最高，而穗在生长 80~100 d 时干物质积累量与日增长量最高，这与藜麦干物质全株日生长量在 60~70 d 和 80~90 d 达到 2 个高峰的结果基本一致，表明这 2 个时期为藜麦快速生长的形态建成期，对应藜麦茎秆伸长和显穗到灌浆的过程<sup>[41]</sup>。茎和穗的干物质积累规律与整个植株的积累规律相似，茎的干物质在生长前期快速增加，而生长中后期，即灌浆期及成熟期，穗的干物质积累量随生长天数的增加而快速增加。而从分配率来说，叶的干物质分配率在生长天数 50 d 时达最高，之后呈下降趋势，而穗的干物质分配率与叶的相反，随生长天数增加呈上升趋势，以生长天数 120 d 时的分配率最高。说明生长前期藜麦的营养生长以茎、根和叶为主，而生长中后期营养物质不断向穗输送而干物质不断增加，与许瑞等<sup>[42]</sup>的研究结果一致，也进一步体现了叶“源”到籽粒“库”的关系<sup>[25]</sup>。

### 3.3 藜麦营养元素积累动态及分配规律

作物干物质积累动态和养分吸收规律在调控作物生长发育和提高产量方面具有重要作用<sup>[43]</sup>。养分吸收与作物的生长速率和干物质积累密切相关<sup>[25]</sup>。氮、磷和钾是植物生长必需的三大营养元素，在作物生长发育的各个阶段起着关键作用<sup>[44]</sup>。藜麦对 3 种主要营养元素的吸收和分配规律呈现出明显的动态变化规律，这些变化对其生长发育和最终产量有着重要影响。藜麦对氮、磷和钾的总吸收量大小为钾 > 氮 > 磷，其吸收比为 4.88:1.00:

11.00，表明藜麦对钾和氮的吸收量大于磷，这一结果与王斌等<sup>[45]</sup>研究结果一致。

氮的积累表现出明显的阶段性特征，研究<sup>[45]</sup>发现，在藜麦生长 60~80 d 期间，氮积累速率达到最高峰，这一阶段也是藜麦干物质迅速积累的关键时期，表明氮吸收对藜麦的生物量增长至关重要。王建瑞等<sup>[46]</sup>的研究表明，不同品系的藜麦在氮吸收和转运上存在差异，但氮的有效利用普遍能够显著提升藜麦产量，与本研究结果基本一致，氮在藜麦生长中期至后期的积累对产量形成有着至关重要的作用。磷的吸收同样呈现出显著的阶段性特点，尤其是在生长 50~70 d 期间，磷的积累量达到峰值。惠薇等<sup>[47]</sup>的研究指出，磷肥的合理施用直接影响藜麦的生长和磷的吸收，适量施磷能够显著提高藜麦的生物量和养分吸收量。这与本研究中磷积累的动态变化趋势相符，进一步证明磷在藜麦生长初期至中期的重要性。藜麦对钾的吸收在 60~70 d 迅速上升，并在 80 d 达到最高值，这与茎的干物质积累规律一致。钾的积累呈现多个吸收高峰，与其在藜麦生长中的多重作用密切相关。DeDatta 等<sup>[48]</sup>研究表明，在充足的钾浓度下，水稻的茎秆和秸秆强度得到增加，有助于提高植物的抗倒伏能力和抗逆性潜力<sup>[49]</sup>。惠薇等<sup>[50]</sup>还发现，钾肥的施用不仅能增加藜麦的株高和生物量，还能显著提高藜麦对氮、磷和钾的综合吸收能力。在藜麦的快速生长期，氮和钾的吸收速率显著增加，这一时期也是干物质积累的关键期，表明充足的氮和钾供应对藜麦的高产至关重要<sup>[27]</sup>。磷的吸收则主要集中在生长前期和中期，其对植株的根系发育和能量代谢具有重要影响<sup>[48]</sup>。

藜麦不同部位的营养元素分配差异显著。穗和茎的氮、磷、钾积累量的大于叶和根的积累量，氮积累量为穗 > 茎 > 叶 > 根，而磷和钾积累量为茎 > 穗 > 叶 > 根。生长初期，氮、磷和钾主要集中在叶和茎中，而在生长后期，更多的营养元素被转移到穗中<sup>[25]</sup>。这一动态分配规律与庞春花等<sup>[27]</sup>的研究结果基本一致，磷肥和钾肥的合理配施能够增强根系对营养元素的吸收，并促进营养元素向穗部的转运，从而提高籽粒的品质。本研究进一步证明藜麦在不同生育期对氮、磷、钾的需求和分配规律。在藜麦的栽培中，需根据不同生长期科学合理地调整施肥策略，确保各生长期内营养元素的最优分配，

以优化藜麦的养分利用效率,提高其生产效益。

## 4 结论

藜麦根重、茎重和穗重与株高、茎粗、叶长、叶宽、主根粗、侧根数、分枝数等农艺性状呈显著正相关;干物质积累呈现明显的“S”形变化规律,生长60~90 d为关键期,期间干物质积累量增加迅速,前期主要为茎和叶的积累,后期则以穗的积累为主,穗的干物质分配率在90 d后达到43.96%。藜麦对氮、磷、钾的吸收表现出显著的阶段性变化,生长60~80 d为吸收高峰期,钾的吸收量最高,吸收比为4.88:1.00:11.00,氮、磷、钾在生长前期主要分配于叶和茎中,90 d后更多地转移至穗部。

### 参考文献

- [1] Walters H, Carpenter-Boggs L, Desta K, et al. Effect of irrigation, intercrop, and cultivar on agronomic and nutritional characteristics of quinoa. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2016, 40(8): 783-803.
- [2] Vega-Gálvez A, Miranda M, Vergara J, et al. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(15): 2541-2547.
- [3] Vilcacundo R, Hernández-Ledesma B. Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Current Opinion in Food Science*, 2017, 14: 1-6.
- [4] 王晨静, 赵习武, 陆国权, 等. 藜麦特性及开发利用研究进展. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(2): 296-301.
- [5] Huchzermeyer B, Koyro H W. Salt and drought stress effects on photosynthesis/Pessaraki M. *Handbook of Photosynthesis*. 2nd ed. New York: CRC Press, 2005: 751-777.
- [6] Shabala S, Jacobsen S E, Bendevis M, et al. Sensitivity of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties to progressive drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, 200(1): 12-23.
- [7] Bois J F, Winkler T, Lhomme J P, et al. Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(4): 299-308.
- [8] Jacobsen S E, Mujica A, Jensen C R. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. *Food Reviews International*, 2003, 19: 99-109.
- [9] 杨发荣, 黄杰, 魏玉明, 等. 藜麦生物学特性及应用. *草业科学*, 2017, 34(3): 607-613.
- [10] Abugoch James L E. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2009, 58: 1-31.
- [11] Repo-Carrasco R, Espinoza C, Jacobsen S E. Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Reviews International*, 2003, 19(1/2): 179-189.
- [12] 刘正杰, 李玉平, 张盟, 等. 云南省藜麦引进栽培及产业发展现状研究. *现代农业科技*, 2021(10): 4-9.
- [13] Wang S N, Zhu F. Formulation and quality attributes of quinoa food products. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(1): 49-68.
- [14] Bhargava A, Shukla S, Ohri D. Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 2007, 101(1): 104-116.
- [15] 黄杰, 杨发荣. 藜麦在甘肃的研发现状及前景. *甘肃农业科技*, 2015(1): 49-52.
- [16] 任永峰, 王志敏, 赵沛义, 等. 内蒙古阴山北麓区藜麦生态适应性研究. *作物杂志*, 2016(2): 79-82.
- [17] 姚庆, 西尔娜依, 崔宏亮. 新疆伊犁河谷藜麦适应性研究初报. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 576-579.
- [18] 王艳青, 李勇军, 李春花, 等. 藜麦主要农艺性状与单株产量的相关和通径分析. *作物杂志*, 2019(6): 156-161.
- [19] 彭识, 李朝凤, 王灿星, 等. 丽江优质藜麦栽培技术. *中国农技推广*, 2018, 34(12): 44-45.
- [20] 徐天才, 和桂青, 李兆光, 等. 不同海拔藜麦的营养成分差异性研究. *中国农学通报*, 2017, 33(17): 129-133.
- [21] 刘敏国, 王士嘉, 杨惠敏, 等. 河西走廊藜麦 C、N、P 生态化学计量学特征对物候期的响应. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 192-198.
- [22] 齐天明, 李志坚, 秦培友, 等. 藜麦栽培技术研究与应用展望. *中国农业科技导报*, 2022, 24(3): 157-165.
- [23] 宋娇, 姚有华, 刘洋, 等. 6个藜麦品种(系)农艺性状的主成分分析. *青海大学学报*, 2017, 35(6): 6-10.
- [24] 王思宇, 左文博, 朱凯莉, 等. 71份藜麦品种资源的农艺性状及营养品质分析与评价. *作物杂志*, 2022(3): 63-72.
- [25] 魏玉明, 杨发荣, 刘文瑜, 等. 藜麦不同生育期营养物质积累与分配规律. *草业科学*, 2018, 35(7): 1720-1727.
- [26] 王斌, 赵国峰, 聂督, 等. 旱作藜麦养分吸收规律及养分限制因子研究. *中国土壤与肥料*, 2020(4): 172-177.
- [27] 庞春花, 张紫薇, 张永清. 水磷耦合对藜麦根系生长、生物量积累及产量的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(21): 4107-4117.
- [28] 李兆光, 杨文高, 和桂青, 等. 滇西北藜麦氮磷钾生态化学计量特征的物候期动态. *植物生态学报*, 2023, 47(5): 724-732.
- [29] 黄杰, 杨发荣, 李敏权, 等. 13个藜麦材料在甘肃临夏旱作区适应性的初步评价. *草业学报*, 2016, 25(3): 191-201.
- [30] 张燕红, 郭占斌, 刘瑞香. 50份藜麦种质资源农艺性状的综合分析与评价. *中国农业科技导报*, 2024, 26(6): 45-54.
- [31] 王艳青, 李春花, 卢文洁, 等. 135份国外藜麦种质主要农艺性状的遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(5): 887-894.
- [32] 黄杰, 刘文瑜, 吕玮, 等. 38份藜麦种质资源农艺性状与产量的关系分析. *甘肃农业科技*, 2018(12): 72-75.
- [33] 马丽娜, 魏玉明, 文莉芳, 等. 云南元谋地区22份藜麦种质的农艺性状及营养品质分析. *作物杂志*, 2024(6): 47-54.
- [34] 邓妍, 王娟玲, 王创云, 等. 生物菌肥与无机肥配施对藜麦农艺性状、产量性状及品质的影响. *作物学报*, 2021, 47(7): 1383-1390.
- [35] 闫江伟, 张国娟, 田景山, 等. 不同施肥量对早熟陆地棉品种干物质累积及产量品质的影响. *新疆农业科学*, 2021, 58(11): 2000-2010.
- [36] 何佩云, 申欣然, 张欣, 等. 中国藜麦栽培生理研究进展. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(1): 114-120.
- [37] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 等. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 423-430.

- [38] 齐文增, 陈晓璐, 刘鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 26-36.
- [39] 刘灵娣, 刘梦星, 孙学, 等. 菘蓝干物质积累及氮磷钾吸收、分配动态变化规律研究. 中国农业科技导报, 2017, 19(6): 39-45.
- [40] 曹新川, 郭伟锋, 胡守林, 等. 不同开花时期陆地棉铃部干物质积累规律. 西北农业学报, 2020, 29(2): 224-230.
- [41] 任永峰, 梅丽, 杨亚东, 等. 播期对藜麦农艺性状及产量的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 643-656.
- [42] 许瑞, 周祯莹, 刘敏国. 藜麦地上部干物质积累特征及饲用品质分析. 草原与草坪, 2023, 43(4): 90-96.
- [43] 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. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 902-909.
- [44] 周喜荣, 张丽萍, 蒋鹏, 等. 宁夏枸杞生育期干物质与氮磷钾积累动态和养分需求规律. 中国土壤与肥料, 2021(1): 262-272.
- [45] 王斌, 聂督, 赵圆峰, 等. 水氮耦合对藜麦产量、氮素吸收和水氮利用的影响. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 87-94.
- [46] 王建瑞, 刘瑞香, 郭占斌, 等. 不同品系藜麦干物质和氮素积累转运对产量的影响. 农业与技术, 2024, 44(9): 9-15.
- [47] 惠薇, 李丽君, 王斌, 等. 磷肥对藜麦生长及养分吸收的影响. 山西农业科学, 2021, 49(4): 444-448.
- [48] DeDatta J G, Mikkelsen D S. Potassium Nutrition in Rice. Madison WI, USA: American Society of Agronomy, 1985: 665-699.
- [49] Wang M, Zheng Q S, Shen Q R, et al. The critical role of potassium in plant stress response. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(4): 7370-7390.
- [50] 惠薇, 王斌, 李丽君, 等. 钾肥对藜麦生长及养分吸收的影响. 山西农业科学, 2021, 49(6): 734-738.

## Study on the Growth Characteristics and Dynamic Changes of Nutrient Absorption and Distribution in Quinoa

He Guiqing, Li Zhaoguang, Yuan Wenjue, He Qiongji, Yang Wengao,  
Li Yan, Wang Rui, Ye Lei, Hou Zhijiang

(Institute of Alpine Economic Plants, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Lijiang 674100, Yunnan, China)

**Abstract** Field sampling of quinoa (*Chenopodium quinoa*) was conducted at different growth stages to measure changes in major agronomic traits, dry matter accumulation, and nutrient element content. The results indicated that dry matter accumulation in quinoa followed an S-shaped curve, with a critical period between 60 and 90 days after emergence. There were significant differences in the dry matter allocation ratio and nutrient uptake rates among different parts of quinoa (roots, stems, leaves, panicles) at various growth stages. Notably, the uptake of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) peaked between 60 and 80 days of growth, with K having the highest absorption rate, followed by N, and then P, at a ratio of 4.88:1.00:11.00. The distribution of nutrients in quinoa exhibited dynamic change regularity over time, and nutrients were mainly concentrated in leaves and stems during the early growth stage and shifted more towards the panicles in the later stage. Additionally, the agronomic traits of quinoa were also found to be significantly correlated with dry matter accumulation. Root weight, stem weight and panicle weight were positively correlated with plant height, stem diameter and leaf length.

**Key words** *Chenopodium quinoa*; Agronomic trait; Dry matter accumulation; Nutrient uptake; Dynamic change