

马思宇, 刘瑞香, 郭占斌, 等. 藜麦光合特性及非结构性碳水化合物含量与产量的关系[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1378-1385.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.003

## 藜麦光合特性及非结构性碳水化合物含量与产量的关系

马思宇<sup>1</sup>, 刘瑞香<sup>1</sup>, 郭占斌<sup>2</sup>, 杨瑞萍<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 内蒙古益稷生物科技有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010011)

**摘要:** 以陇藜 4 号、Z4、青藜、蒙 4、蒙 5 等 5 个品种(系)藜麦为试验材料, 研究藜麦的光合性能、非结构性碳水化合物含量及其与产量的关系。分别在分枝期、现穗期、开花期、灌浆期、成熟期测定中上部叶片的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、叶片水分利用效率( $WUE$ )、叶绿素含量以及非结构性碳水化合物含量, 成熟后测定产量。结果表明, 5 个品种(系)藜麦的产量存在显著差异, 陇藜 4 号的产量最高。藜麦叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $WUE$  随生育进程推进均呈先上升后下降的趋势,  $C_i$  与叶绿素含量在整个生育期呈下降趋势。非结构性碳水化合物含量在整个生育期的变化趋势不同。藜麦分枝期  $P_n$  与产量呈显著正相关, 灌浆期  $P_n$  与产量呈极显著正相关;  $G_s$  在现穗期与产量呈极显著正相关, 开花期  $G_s$  与产量呈显著正相关;  $C_i$ 、 $T_r$ 、 $WUE$  与产量的相关性不显著。灌浆期可溶性糖含量与产量呈显著正相关; 蔗糖含量、果糖含量、葡萄糖含量与产量的相关性不显著; 可溶性淀粉含量与产量在成熟期呈极显著正相关。藜麦产量高低受多因素综合作用, 藜麦生育中后期的  $P_n$ 、 $G_s$  是高产、高光效品种鉴定评价的重要指标, 应侧重培育在灌浆期与成熟期可溶性糖含量高与可溶性淀粉含量高的品种。

**关键词:** 藜麦; 光合特性; 非结构性碳水化合物; 产量; 相关性

**中图分类号:** S519 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1378-08

## Photosynthetic characteristics and the relationship between non-structural carbohydrates content and yield of quinoa

MA Si-yu<sup>1</sup>, LIU Rui-xiang<sup>1</sup>, GUO Zhan-bin<sup>2</sup>, YANG Rui-ping<sup>1</sup>

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China; 2. Inner Mongolia Yiji Biotechnology Co., Ltd., Hohhot 010011, China)

**Abstract:** The photosynthetic performance, non-structural carbohydrate content and its relationship with yield of quinoa were studied by using five varieties (lines) of quinoa (Longli No.4, Z4, Qingli, Meng4 and Meng5) as experimental materials. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), water use efficiency ( $WUE$ ), chlorophyll content and non structural carbohydrate content of middle and upper leaves were measured at branching stage, panicle stage, flowering stage, grain filling stage and milky stage respectively, and the yield was determined after maturity. The results showed that there were significant differences in the yield of quinoa among five varieties (lines), Longli No.4 had the highest yield. The  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $T_r$  and  $WUE$  of quinoa increased first

and then decreased with the growth process, while the contents of  $C_i$  and chlorophyll decreased during the whole growth period. The variation trend of non-structural carbohydrates content was different during the whole growth period. There was a significant positive correlation between  $P_n$  and yield at branching stage and extremely significant positive correlation between  $P_n$  and yield at filling stage.  $G_s$  was significantly positively correlated with yield at heading

收稿日期: 2021-03-15

基金项目: 内蒙古关键技术攻关项目(2019GG355); 内蒙古自然科学基金项目(2020MS03091); 呼和浩特市应用技术与开发项目(2019-农-20)

作者简介: 马思宇(1994-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为植物资源保护与利用。(E-mail) sm370103@163.com

通讯作者: 刘瑞香, (E-mail) liuruix@126.com

stage, and there was a significant positive correlation between  $G_2$  and yield at flowering stage. There was no significant correlation between  $C_i$ ,  $T_r$ ,  $WUE$  and yield. There was a significant positive correlation between soluble sugar content and yield at the filling stage. There was no significant correlation between sucrose content, fructose content, glucose content and yield. There was a significant positive correlation between soluble starch content and yield at maturity stage. The yield of quinoa is affected by multiple factors. The  $P_n$  and  $G_s$  in the middle and late growth period of quinoa are important indices for the identification and evaluation of high-yield and high-light-efficiency varieties, and the cultivars with high soluble sugar content and high soluble starch content in the grain-filling stage and mature stage should be cultivated.

**Key words:** quinoa; photosynthetic characteristics; non-structural carbohydrate; yield; relevance

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.) 是一年生藜科藜属双子叶草本植物,原产于南美洲安第斯山脉一带的玻利维亚、秘鲁、厄瓜多尔等地,距今已有 5 000 多年的种植历史。它是早期印加人的主要传统食物,被当地人称为“粮食之母”<sup>[1-2]</sup>,籽实不仅含有大量的蛋白质、维生素及矿物质,还富含人体生命活动所必须的多种氨基酸<sup>[3-4]</sup>。藜麦具有耐旱、耐寒、耐盐碱等生物学特征,在肥力不充足的土地上仍然能够很好地生长<sup>[5]</sup>。藜麦全株均可利用,具有较高的经济效益和多种利用价值,引种藜麦还可以改善当地生态环境、丰富粮食种类。近年来藜麦受到广泛关注<sup>[6-7]</sup>。中国西藏农牧学院和西藏农业科学院早在 1987 年就开始了藜麦的引种栽培试验,随后在西藏境内小面积试种成功,目前在甘肃、青海、山西、新疆、内蒙古等地都有种植<sup>[8-12]</sup>。近年来,中国对藜麦的探索和研究不断加深,藜麦产业发展水平不断提高。国内开展了藜麦的抗性<sup>[13-15]</sup>、营养品质<sup>[16-20]</sup>以及藜麦的加工与利用<sup>[21-23]</sup>等研究。藜麦还被制作成面包、酸奶、啤酒等产品。

光合作用是作物最基本的生理过程之一,作物产量中有 90%~95% 来自光合作用形成的物质。研究结果表明,当作物产量随品种改良和栽培条件改善得到提高后,提高作物产量的主要途径就是改善和提高作物光合机能、提高光能利用率<sup>[24-25]</sup>,所以为了达到增产目的,研究作物的光合生理特性极为重要。叶绿素是光合作用必不可少的光合色素,能吸收、传递和转化光能。叶片的叶绿素含量是反映光合能力的重要指标,其含量的多少直接影响叶片的光合能力,是评价植株体生理状况的一项重要指标<sup>[26-28]</sup>。植物光合作用产物中的非结构性碳水化合物(NSC)由可溶性糖及淀粉组成,可溶性糖主要包括葡萄糖、果糖和蔗糖等。非结构性碳水化合物是参与植物代谢活动的重要物质<sup>[29]</sup>,为植物的生长发育提供能量,也是植物养分的主要贮藏方式。李天来等<sup>[30]</sup>的研究结果表

明,2 个耐低温品系番茄叶片的碳水化合物含量会随低温处理时间的延长而增多,且叶片净光合速率的降低与淀粉含量的增加有密切联系。

目前对藜麦的研究主要集中在抗性、适应性以及藜麦的加工利用等方面,对于藜麦的光合特性变化及其与产量的相关性研究较少。因此,探究藜麦光合性能指标、非结构性碳水化合物及其与产量的关系是实现藜麦高产的焦点问题。本研究选用 5 个品种(系)的藜麦,通过研究藜麦各生育时期的光合性能指标、叶片非结构性碳水化合物含量变化,进而分析光合性能指标、非结构性碳水化合物含量与产量之间的关系,为藜麦高产栽培管理与大面积推广提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2020 年在内蒙古呼和浩特市赛罕区内蒙古生物科技研究院试验基地进行,该地区属于典型中温带半干旱大陆性气候,年降水量 350~450 mm,无霜期平均为 125 d 左右。试验地土壤全氮含量为 1.007 g/kg,全磷含量为 0.199 g/kg,全钾含量为 15.455 g/kg,碱解氮含量为 266.01 mg/kg,速效磷含量为 56.19 mg/kg,速效钾含量为 168.71 mg/kg。

### 1.2 试验材料与试验设计

本试验选用陇藜 4 号、Z4、青藜、蒙 4、蒙 5 共 5 个品种(系)的藜麦作为试验材料。采用品种单因素试验,田间采用随机区组设计,3 次重复,小区面积 20 m<sup>2</sup> (4.0 m×5.0 m)。2020 年 5 月 29 日播种,覆膜点播,播种深度 3.0 cm,株距 16.5 cm,行距 50.0 cm。分枝期间苗,每穴留 1 株。试验地藜麦全生育期的管理(包括除草、浇水、防治病虫害等)同大田管理。

### 1.3 指标与测定方法

1.3.1 产量的测定 产量的测定在藜麦有 50% 以

上的叶片泛黄、籽粒变硬时进行。每个小区随机抽取 5 株长势一致具有代表性的植株,晾干后进行脱粒,测定单株籽粒质量,随机选取 1 000 粒种子,称质量,测定千粒质量。产量=平均单株籽粒质量×实际留苗数×(1-损失率),损失率:植株出现倒伏、病虫害及穗发芽等导致的产量下降百分率,本试验中主要为茎秆倒伏引起的损失。

**1.3.2 光合性能的测定** 每个小区随机选取生长一致、无病虫害的 3 株藜麦进行挂牌标记,以植株中上部叶片为测定对象,采用 GFS-3000 光合仪(德国 WALZ 公司产品)测定光合气体交换参数。于藜麦分枝期、现穗期、开花期、灌浆期、成熟期,选择晴朗无云的天气,在自然光下分别测定净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ ),由  $P_n$  和  $T_r$  计算出叶片水分利用效率( $WUE=P_n/T_r$ );测定时间 9:00–11:30,每次测定按田间小区种植顺序进行,重复 3 次。

**1.3.3 叶绿素含量的测定** 每个小区随机选取长势一致有代表性的 3 株藜麦,每株选取主枝穗位叶,避光带回室内,采用二甲基亚砷法浸提叶绿素<sup>[31]</sup>。计算公式为: $Chla = (12.19A_{665} - 3.45A_{649}) \times V / 1\ 000S$ ,  $Chlb = (21.99A_{649} - 0.32A_{665}) \times V / 1\ 000S$ ,

$Car = (1\ 000 A_{480} - 2.14 Chla - 70.16 Chlb) / 220 \times V / 1\ 000S$ ,其中, $V$ 为提取液体积(ml), $S$ 为表面积( $m^2$ ), $Chla$ 为叶绿素 a 含量, $Chlb$ 为叶绿素 b 含量, $Car$ 为类胡萝卜素含量; $A_{665}$ 、 $A_{649}$ 、 $A_{480}$ 分别代表 662 nm、645 nm 和 480 nm 处的吸光度值。

**1.3.4 非结构性碳水化合物含量的测定** 根据吴强盛<sup>[32]</sup>的方法测定非结构性碳水化合物含量。可溶性糖含量测定采用蒽酮-硫酸比色法,蔗糖含量、果糖含量、葡萄糖含量、可溶性淀粉含量采用比色法测定。

## 1.4 数据分析

采用 Excel 2012 进行数据处理和作图,采用 SPSS20.0 进行方差分析和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 藜麦的产量及其构成因素

5 个品种(系)的藜麦在试验地均能正常成熟。由表 1 可知,5 个品种(系)的藜麦千粒质量为 2.74~3.59 g, Z4 的千粒质量显著小于其他品种(系);单株粒质量为 26.70~87.33 g,蒙 5 单株粒质量最高,青藜单株粒质量显著小于其他品种(系);收获株数为每个小区 13.33~40.67 株;产量为 887.83~2 949.22 kg/hm<sup>2</sup>,其中陇藜 4 号的产量最高。

表 1 藜麦的产量及其构成因素

Table 1 Yield of quinoa and its components

材料	千粒质量(g)	单株粒质量(g)	每小区株数	产量(kg/hm <sup>2</sup> )
陇藜 4 号	3.21±0.12b	74.91±3.27ab	39.33±2.31a	2 949.22±265.38a
Z4	2.74±0.08c	72.42±2.51ab	40.67±1.15a	2 947.15±187.33a
青藜	3.48±0.06a	26.70±2.19c	33.33±4.04b	887.83±103.30b
蒙 4	3.48±0.04a	68.61±1.43b	14.00±2.00c	960.10±132.46b
蒙 5	3.59±0.15a	87.33±17.43a	13.33±1.53c	1 182.05±372.84b

同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

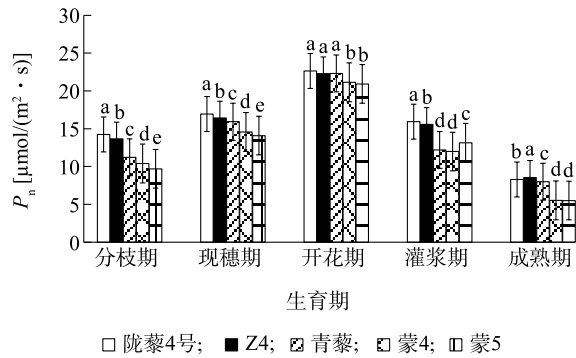
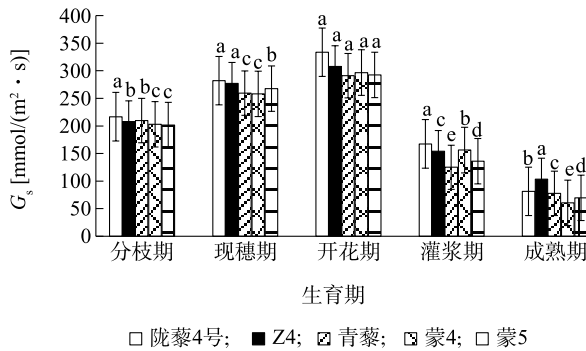
### 2.2 藜麦叶片的光合特性

**2.2.1 不同生育期藜麦叶片净光合速率( $P_n$ )的变化** 由图 1 可知,5 个品种(系)的藜麦  $P_n$  均呈先上升后下降的趋势,开花期  $P_n$  达到最大值,成熟期  $P_n$  最低。分枝期和现穗期 5 个品种(系)的藜麦  $P_n$  存在显著差异,陇藜 4 号的  $P_n$  显著高于其他品种(系),蒙 5 的  $P_n$  显著低于其他品种(系)。开花期和灌浆期陇藜 4 号的  $P_n$  显著高于蒙 4 和蒙 5;成熟期 Z4 的  $P_n$  显著高于其他品种(系)。

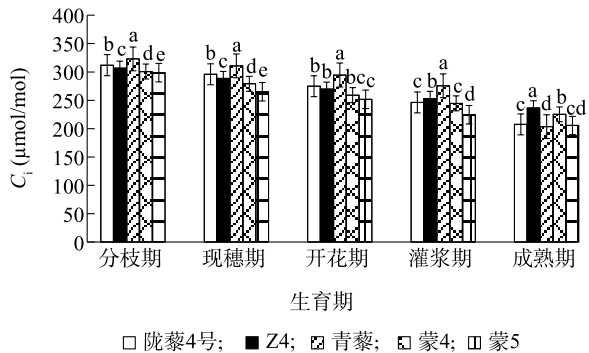
**2.2.2 不同生育期藜麦叶片气孔导度( $G_s$ )的变化**

由图 2 可知, $G_s$  呈先上升后下降的趋势,在开花期达到最大值,成熟期时最低。分枝期陇藜 4 号的  $G_s$  显著高于其他品种(系);开花期不同品种(系)藜麦  $G_s$  无显著差异;灌浆期陇藜 4 号的  $G_s$  显著高于其他品种(系),青藜的  $G_s$  显著低于其他材料;成熟期 Z4 的  $G_s$  显著高于其他品种(系),蒙 4 的  $G_s$  显著低于其他品种(系)。

**2.2.3 不同生育期藜麦叶片胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的变化** 由图 3 可知,藜麦叶片  $C_i$  在整个生育期呈下降趋势,分枝期最高,成熟期最低。分枝期和现穗期

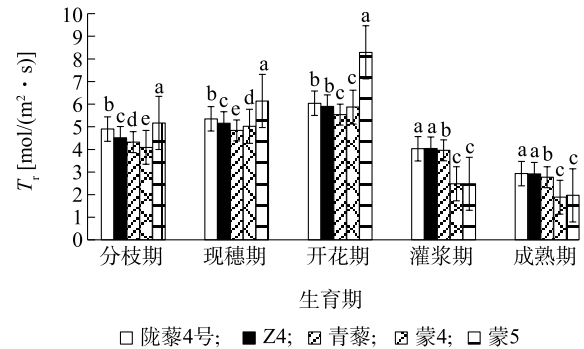
图1 不同生育期藜麦叶片净光合速率( $P_n$ )的变化Fig.1 Changes of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of quinoa leaves in different growth stages图2 不同生育期藜麦叶片气孔导度( $G_s$ )的变化Fig.2 Changes of stomatal conductance ( $G_s$ ) of quinoa leaves in different growth stages

青藜的  $C_i$  显著高于其他品种(系),蒙5的  $C_i$  显著低于其他品种(系);开花期和灌浆期青藜的  $C_i$  显著高于其他品种(系),蒙5的  $C_i$  低于其他品种(系);成熟期Z4的  $C_i$  显著高于其他品种(系),青藜的  $C_i$  显著低于其他品种(系)。

图3 不同生育期藜麦叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )的变化Fig.3 Changes of intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ) of quinoa leaves in different growth stages

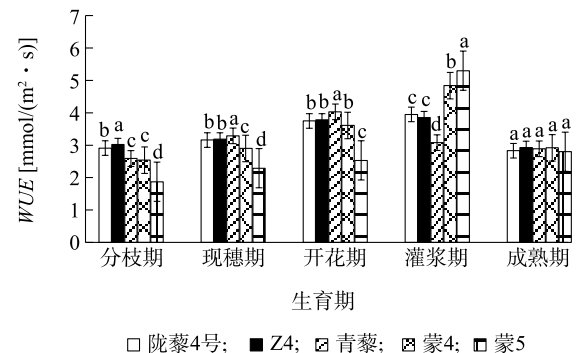
## 2.2.4 不同生育期藜麦叶片蒸腾速率( $T_r$ )的变化

由图4可知,藜麦叶片  $T_r$  呈先上升后下降的趋势,开花期达到最大,成熟期最低。分枝期蒙5的  $T_r$  显著高于其他品种(系),蒙4的  $T_r$  显著低于其他品种(系);现穗期蒙5的  $T_r$  显著高于其他品种(系),青藜的  $T_r$  显著低于其他品种(系);灌浆期和成熟期蒙4、蒙5的  $T_r$  显著低于其他品种(系)。

图4 不同生育期藜麦叶片蒸腾速率( $T_r$ )的变化Fig.4 Changes of transpiration rate ( $T_r$ ) of quinoa leaves in different growth stages

## 2.2.5 不同生育期藜麦叶片水分利用效率( $WUE$ )的变化

由图5可知,整个生育期藜麦叶片  $WUE$  呈先上升后下降的趋势,除青藜外,其他品种(系)的藜麦叶片  $WUE$  灌浆期最大。分枝期Z4的  $WUE$  显著高于其他品种(系),蒙5的  $WUE$  显著低于其他品种(系);现穗期和开花期青藜的  $WUE$  显著高于其他品种(系),蒙5的  $WUE$  显著低于其他品种(系);灌浆期蒙5的  $WUE$  显著高于其他品种(系),青藜的  $WUE$  显著低于其他品种(系);成熟期不同品种(系)的  $WUE$  无显著差异。

图5 不同生育期藜麦叶片水分利用效率( $WUE$ )的变化Fig.5 Changes of water use efficiency ( $WUE$ ) of quinoa leaves in different growth stages



### 2.2.6 不同生育期藜麦叶片叶绿素含量的变化

由图 6 可知,整个生育期藜麦叶片叶绿素含量呈下降趋势。分枝期藜麦叶片叶绿素含量最高,其中陇藜 4 号的叶绿素含量最高,显著高于其他品种(系);现穗期 Z4 的叶绿素含量显著低于其他品种(系);开花期陇藜 4 号的叶绿素含量高于其他品种(系);灌浆期 Z4 的叶绿素含量显著低于其他品种(系);在整个生育期,成熟期叶绿素含量最低,且 5 个品种(系)藜麦叶绿素含量无显著差异。

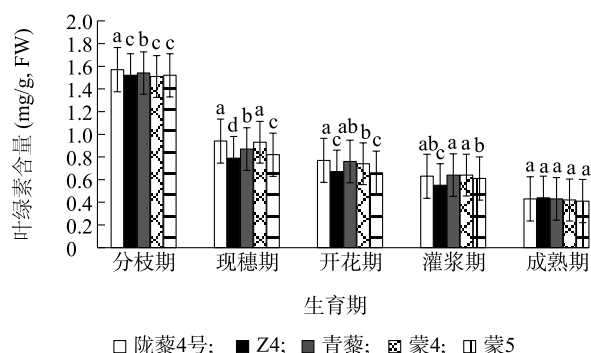


图 6 不同生育期藜麦叶片叶绿素含量的变化

Fig.6 Changes of chlorophyll content of quinoa leaves in different growth stages

## 2.3 不同生育期藜麦叶片非结构性碳水化合物含量的变化

### 2.3.1 不同生育期藜麦叶片可溶性糖含量的变化

由图 7 可知,在整个生育期不同品种(系)藜麦叶片的可溶性糖含量变化趋势不同。分枝期不同藜麦品种(系)的可溶性糖含量差异显著,青藜的可溶性糖含量显著高于其他品种(系),陇藜 4 号的可溶性糖含量显著低于其他品种(系);现穗期与开花期蒙 4 的可溶性糖含量显著高于其他品种(系);灌浆期陇藜 4 号的可溶性糖含量高于其他品种(系),青藜的可溶性糖含量低于其他品种(系);成熟期 Z4 的可溶性糖含量显著高于其他品种(系)。

2.3.2 不同生育期藜麦叶片蔗糖含量的变化 由图 8 可知,分枝期蒙 5 的蔗糖含量最高;现穗期蒙 5 的蔗糖含量显著高于其他品种(系),陇藜 4 号的蔗糖含量低于其他品种(系);开花期 Z4 的蔗糖含量最低;成熟期陇藜 4 号的蔗糖显著高于其他品种(系),青藜的蔗糖含量低于其他品种(系)。

2.3.3 不同生育期藜麦叶片果糖含量的变化 由图 9 可知,分枝期蒙 5 的果糖含量显著高于其他品种(系),蒙 4 的果糖含量显著低于其他品种(系);灌浆期陇藜 4 号的果糖含量显著高于其他品种(系);成熟期蒙 5 的果糖含量显著高于其他品种(系),青藜的果糖含量显著低于其他品种(系)。

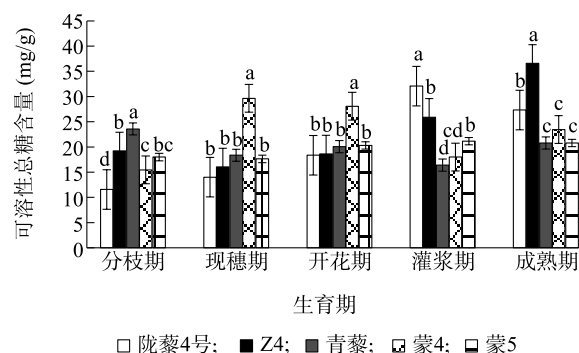


图 7 不同生育期藜麦叶片可溶性糖含量的变化

Fig.7 Changes of soluble sugar content of quinoa leaves in different growth stages

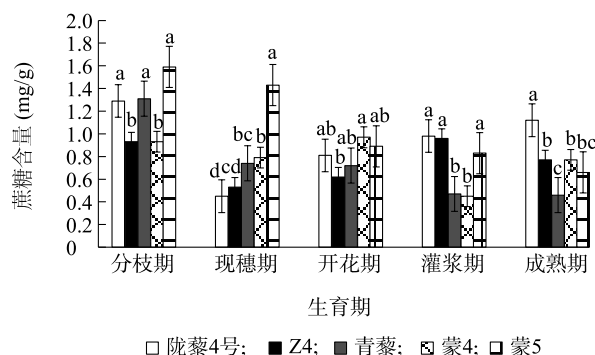


图 8 不同生育期藜麦叶片蔗糖含量的变化

Fig.8 Changes of sucrose content of quinoa leaves in different growth stages

种(系),蒙 4 的果糖含量显著低于其他品种(系);灌浆期陇藜 4 号的果糖含量显著高于其他品种(系);成熟期蒙 5 的果糖含量显著高于其他品种(系),青藜的果糖含量显著低于其他品种(系)。

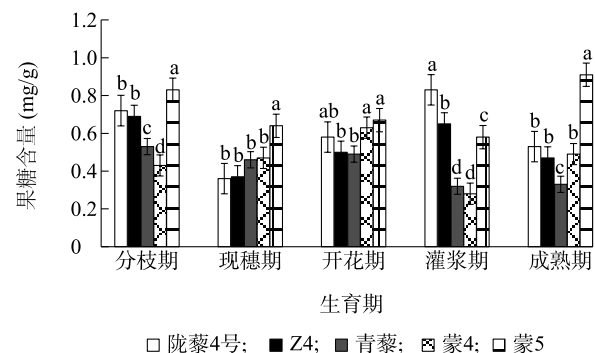


图 9 不同生育期藜麦叶片果糖含量的变化

Fig.9 Changes of fructose content of quinoa leaves in different growth stages

### 2.3.4 不同生育期藜麦叶片葡萄糖含量的变化

由图 10 可知,分枝期不同品种(系)藜麦叶片的葡萄糖含量

萄糖含量存在显著差异,Z4 的葡萄糖含量显著高于其他品种(系),蒙 5 的葡萄糖含量低于其他品种(系);现穗期蒙 5 的葡萄糖含量显著低于其他品种(系);开花期陇藜 4 号的葡萄糖含量为 8.49 mg/g,显著高于其他品种(系)。

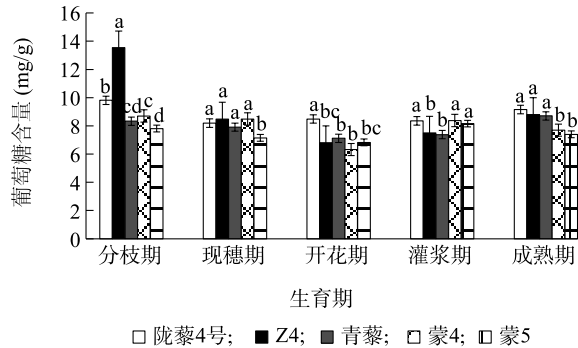


图 10 不同生育期藜麦叶片葡萄糖含量的变化  
Fig.10 Changes of glucose content of quinoa leaves in different growth stages

2.3.5 不同生育期藜麦叶片可溶性淀粉含量的变化 由图 11 可知,分枝期蒙 5 的可溶性淀粉含量为 25.07 mg/g,显著高于其他品种(系);现穗期蒙 4 的可溶性淀粉含量为 12.84 mg/g,显著高于其他品种(系),Z4 的可溶性淀粉含量为 4.96 mg/g,显著低于其他品种(系);开花期各不同品种(系)藜麦的可溶性淀粉含量存在显著差异,蒙 4 的可溶性淀粉含量显著高于其他品种(系);灌浆期不同品种(系)藜麦的可溶性淀粉含量存在显著差异,陇藜 4 号的可溶性淀粉含量显著高于其他品种(系),蒙 4 的可溶性淀粉含量显著低于其他品种(系);成熟期青藜的可溶性淀粉含量为 4.57 mg/g,显著低于其他品种(系)。

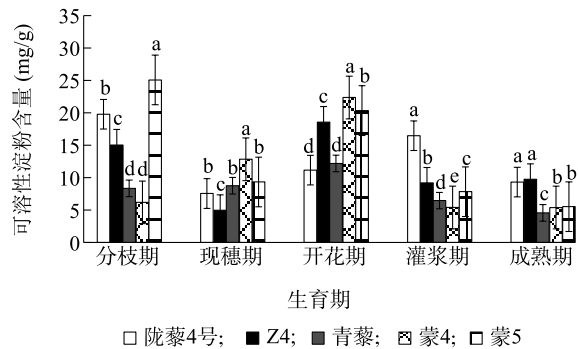


图 11 不同生育期藜麦叶片可溶性淀粉含量的变化  
Fig.11 Changes of soluble starch content of quinoa leaves in different growth stage

2.4 相关性分析

2.4.1 各生育期光合性状与产量的相关性 相关性分析结果(表 2)表明,不同品种(系)藜麦各生育时期的  $P_n$  与产量呈正相关。其中分枝期  $P_n$  与产量呈显著正相关,灌浆期  $P_n$  与产量呈极显著正相关。 $G_s$  与产量呈正相关,其中现穗期  $G_s$  与产量的相关性达极显著水平,开花期  $G_s$  与产量呈显著正相关。 $C_i$ 、 $T_r$ 、 $WUE$  与叶绿素含量在各生育时期与产量无显著相关关系。

表 2 各生育期光合性状与产量的相关系数  
Table 2 The correlation coefficient between photosynthetic characters and yield at different growth stages

光合性状	产量				
	分枝期	现穗期	开花期	灌浆期	成熟期
$P_n$	0.927 *	0.769	0.655	0.987 **	0.693
$G_s$	0.649	0.972 **	0.880 *	0.729	0.717
$C_i$	0.011	0.112	0.015	-0.100	0.328
$T_r$	0.361	0.066	-0.153	0.605	0.675
$WUE$	0.664	0.337	0.145	-0.668	-0.052
叶绿素含量	0.476	-0.109	-0.073	-0.608	0.656

\* 表示在 0.05 水平显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平显著相关。

2.4.2 各生育期非结构性碳水化合物含量与产量的相关性 由表 3 可知,不同品种(系)藜麦各生育期可溶性糖含量在分枝期、现穗期、开花期与产量呈负相关,但不显著,在灌浆期与产量呈显著正相关;蔗糖含量、果糖含量、葡萄糖含量在各生育期与产量相关性不显著;可溶性淀粉含量与产量在成熟期呈极显著正相关。

表 3 各生育期非结构性碳水化合物含量与产量的相关系数  
Table 3 Correlation coefficient between yield and non-structural carbohydrate content at different growth stages

非结构性 碳水化合物 含量	产量				
	分枝期	现穗期	开花期	灌浆期	成熟期
可溶性糖	-0.472	-0.638	-0.611	0.923 *	0.844
蔗糖	-0.266	-0.631	-0.545	0.866	0.735
果糖	0.455	-0.704	-0.320	0.865	-0.093
葡萄糖	0.792	0.413	0.590	-0.013	0.696
可溶性淀粉	0.382	-0.779	-0.333	0.796	0.993 **

\* 表示在 0.05 水平显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平显著相关。

3 讨论

光合作用是决定作物产量的重要因素,作物产

量的90%~95%直接或间接来源于光合作用<sup>[33]</sup>。李照君等<sup>[34]</sup>研究发现,大豆的产量在结荚期和鼓粒期与  $P_n$  日均值呈显著正相关,与  $C_i$  日均值呈显著负相关;在鼓粒期和成熟期  $G_s$  日均值与产量呈显著正相关,说明结荚期至成熟期,  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  日均值是高产、高光效品种鉴定评价的重要指标。马淑蓉等<sup>[35]</sup>的研究结果表明,小豆籽粒产量与开花后各节位功能叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $WUE$  平均值呈极显著或显著正相关,与  $C_i$  呈显著负相关。冯国郡等<sup>[36]</sup>的研究结果表明,甜高粱的生物产量与  $P_n$  呈极显著正相关。本研究中不同品种(系)藜麦各生育期的  $P_n$  与产量呈正相关,其中分枝期  $P_n$  与产量呈显著正相关,灌浆期  $P_n$  与产量呈极显著正相关,与李照君等、马淑蓉等、冯国郡等的研究结果一致;现穗期、开花期和成熟期  $P_n$  与产量均呈正相关,但未达到显著水平。 $G_s$  与产量呈正相关,其中现穗期  $G_s$  与产量的相关性达极显著水平,与李照君等、马淑蓉等的研究结果一致;开花期  $G_s$  与产量呈显著正相关,分枝期、灌浆期和成熟期  $G_s$  与产量均呈正相关,但未达到显著水平; $C_i$ 、 $T_r$ 、 $WUE$  与产量无显著相关关系。由此可见产量高低受多因素综合作用<sup>[37-38]</sup>,藜麦生育中后期的  $P_n$ 、 $G_s$  是高产、高光效品种鉴定评价的重要指标。

韩俊梅<sup>[39]</sup>的研究结果表明,杂交大豆结荚期叶片可溶性糖含量最高,  $P_n$  较强,说明结荚期可溶性糖含量与  $P_n$  有一定的联系。申加祥等<sup>[40]</sup>的研究结果表明,在吐丝期玉米叶片中的可溶性糖含量与产量呈正相关。王晓慧等<sup>[41]</sup>的研究结果表明,大豆叶片可溶性糖含量在苗期、花期、结荚期和产量呈正相关,在鼓粒期呈负相关。侯俊峰等<sup>[42]</sup>的研究结果表明,小麦叶片中可溶性糖含量随花后时间的延长呈先增加后下降的趋势,开花期茎鞘中蔗糖和淀粉含量与穗粒质量、产量呈显著正相关。本研究结果表明,不同品种(系)藜麦的可溶性糖含量在灌浆期与产量呈显著正相关,与韩俊梅、王晓慧等的研究结果一致;蔗糖含量、果糖含量、葡萄糖含量与产量在各生育时期与产量的相关性不显著;可溶性淀粉含量与产量在成熟期呈极显著正相关。秋季植物落叶前,叶片中依然保留大量非结构性碳水化合物,能在光合作用不足时起到缓冲作用<sup>[43-44]</sup>。本研究结果表明,灌浆期与成熟期藜麦叶片可溶性糖含量与可溶性淀粉含量高的2个品种为陇藜4号和Z4,其净光合速率与产量也高于其他材料,由此可知,在灌浆

期和成熟期,较高的净光合速率可使藜麦保持较高的可溶性糖含量及可溶性淀粉含量,有利于籽粒干物质的积累,从而达到高产。所以,应侧重培育开花后期叶片可溶性糖含量与可溶性淀粉含量高的品种。

## 参考文献:

- [1] ZURITA-SILVA A, FUENTES, ZAMORA P, et al. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives [J]. *Molecular Breeding*, 2014, 34(1): 13-30.
- [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] RUBÉN V, BLANCA H L. Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2017(14): 1-6.
- [4] PEREIRA E, ENCINA-Z C, BARROS L, et al. Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (Quinoa) grains: a good alternative to nutritious food. [J]. *Food Chemistry*, 2019(280): 110-114.
- [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] 史海萍. 试析藜麦行业研究现状及其商业化种植前景[J]. *南方农业*, 2017, 11(27): 71, 73.
- [7] 刘锁荣, 范文虎. 促进山西藜麦种植规模化及产业链形成的建议[J]. *山西农业科学*, 2011, 39(7): 767-769.
- [8] 王 鑫. 藜麦在山西不同生态区域的适应性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
- [9] 姚 庆, 西尔娜依, 崔宏亮. 新疆伊犁河谷藜麦适应性研究初报[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 576-579.
- [10] 李娜娜, 丁汉凤, 郝俊杰, 等. 藜麦在中国的适应性种植及发展展望[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(10): 31-36.
- [11] 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[J]. *作物杂志*, 2016(2): 79-82.
- [12] 刘 洋, 闫殿海, 毛玉金, 等. 藜麦在青海的引种及适应性鉴定方法探讨[J]. *青海农林科技*, 2016(2): 61-63.
- [13] 王志恒, 黄思麒, 李成虎, 等. 13种藜麦萌发期抗逆性综合评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 25-36.
- [14] 王志恒, 徐中伟, 周吴艳, 等. 藜麦种子萌发阶段响应干旱和盐胁迫变化的综合评价[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(7): 1033-1042.
- [15] 吕亚慈, 郭晓丽, 时丽冉, 等. 不同藜麦品种萌发期抗旱性研究[J]. *种子*, 2018, 37(6): 86-89.
- [16] 石振兴. 国内外藜麦品质分析及其减肥活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [17] 胡一波, 杨修仕, 陆 平, 等. 中国北部藜麦品质性状的多样性和相关性分析[J]. *作物学报*, 2017, 43(3): 464-470.
- [18] 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.
- [19] 王倩朝,孔治有,刘俊娜,等.藜麦籽粒主要营养及抗氧化成分遗传特性分析与评价[J].云南农业大学学报(自然科学版),2020,35(6):931-937.
- [20] 陈志婧,廖成松.7个不同品种藜麦营养成分比较分析[J].食品工业科技,2020,41(23):266-271.
- [21] 李翔,蒋方国,凌云坤,等.响应面法优化藜麦核桃酸奶发酵工艺研究[J].食品研究与开发,2020,41(23):131-136.
- [22] 魏小雁,成宇峰.响应面法优化藜麦面条加工工艺[J].粮食与油脂,2020,33(12):53-58.
- [23] 杨贵恒,聂聪,姚青海,等.藜麦啤酒的酿造方法及香气化合物[J].食品工业,2020,41(11):51-54.
- [24] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科学技术出版社,2000.
- [25] FISCHER R A, REES D, SAYRE K D, et al. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies[J]. Crop Science, 1998, 38: 1467-1475.
- [26] 王雅梅.玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性和水分利用效率的影响[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [27] ZHANG M, SU W, FU Y, et al. Super-resolution enhancement of Sentinel-2 image for retrieving LAI and chlorophyll content of summer corn[J]. European Journal of Agronomy, 2019, 111: 378-396.
- [28] 焦念元,宁堂原,赵春,等.玉米花生间作复合体系光合特性的研究[J].作物学报,2006,32(6):917-923.
- [29] 李培广,周海燕,陈翠云,等.阿拉善荒漠优势植物可溶性糖的季节变化[J].生态学杂志,2012,31(12):3018-3023.
- [30] 李天来,焦晓赤,齐明芳,等.不同耐冷番茄叶片光合速率及可溶性糖的变化特性研究[J].华北农学报,2011,26(4):97-103.
- [31] 王文杰,贺海升,关宇,等.丙酮和二甲基亚砜法测定植物叶绿素和类胡萝卜素的方法学比较[J].植物研究,2009,29(2):224-229.
- [32] 吴强盛.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2018.
- [33] BENDEVIS M, SUN Y, SHABALA S, et al. Differentiation of photo-period-induced ABA and soluble sugar responses of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014, 33(3):562-570.
- [34] 李照君,田汝美,蒲艳艳,等.大豆光合指标日变化规律及其与产量关系研究[J].大豆科学,2020,39(4):577-586.
- [35] 马淑蓉,高小丽,李云,等.不同产量水平小豆叶片的光合特性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(4):79-85.
- [36] 冯国郡,章建新,李宏琪,等.甜高粱光合生理特性及其与产量的关系[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(4):93-100.
- [37] 华劲松,赵应林,王华强,等.不同收获时间对藜麦籽粒产量及物理特性的影响[J].江苏农业科学,2020,48(21):119-122.
- [38] 王艳青,卢文洁,李春花,等.10个藜麦新品系主要农艺性状分析与综合评价[J].南方农业学报,2019,50(3):540-545.
- [39] 韩俊梅.杂交大豆光合生理生化机制的研究[D].太原:山西大学,2013.
- [40] 申加祥,宁堂原,李增嘉,等.不同熟期玉米套作夏玉米可溶性糖含量与产量形成[J].玉米科学,2004,12(2):65-68.
- [41] 王晓慧,徐克章,李大勇,等.大豆品种遗传改良过程中叶片可溶性糖含量和比叶重的变化[J].大豆科学,2007,26(6):879-884.
- [42] 侯俊峰,黄鑫,侯阁阁,等.非结构性碳水化合物积累与小麦植株抗旱性及产量的关系[J].西北农业学报,2017,26(11):1590-1597.
- [43] POURTAU N, MARES M, PURDY S, et al. Interactions of abscisic acid and sugar signalling in the regulation of leaf senescence [J]. Planta, 2004, 219(5):765-772.
- [44] MAI L, HOCH G, KÖRNER C. Source/sink removal affects mobile carbohydrates in *Pinus cembra* at the Swiss treeline [J]. Trees, 2002, 16(4/5):331-337.

(责任编辑:陈海霞)