

DOI: 10.12357/cjea.20240056

CSTR: 32371.14.cjea.20240056

王慧丽, 钟苑宁, 杨晗, 马玉诏, 乔匀周, 张小帅, 黄欣莉, 董宝娣. 水分和温度对藜麦种子萌发出苗及籽粒产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 95–103

WANG H L, ZHONG Y N, YANG H, MA Y Z, QIAO Y Z, ZHANG X S, HUANG X L, DONG B D. Effects of water and temperature on seed germination and grain yield of quinoa[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 95–103

水分和温度对藜麦种子萌发出苗及籽粒产量的影响*

王慧丽^{1,2}, 钟苑宁², 杨 晗², 马玉诏², 乔匀周², 张小帅³, 黄欣莉³, 董宝娣^{1,2**}

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730000; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 3. 张家口市农业高效节水研究所 张家口 076450)

摘 要: 藜麦作为富含营养物质且喜冷凉的旱地作物, 温度和水分是限制其种子萌发和生长的必要条件, 明确温度和干旱胁迫下藜麦的出苗和生长情况对雨养旱作区藜麦高产高效种植有重要意义。本研究以河北坝上地区典型藜麦品种‘冀藜3号’为试验材料, 设置1) 种子萌发试验: 3个干旱胁迫处理 (PEG-6000 溶液渗透势分别为 0、-0.3、-0.6 MPa) 和4个种子萌发温度 (10 °C/0 °C、15 °C/5 °C、20 °C/10 °C、25 °C/15 °C), 分析干旱和温度胁迫及其互作效应对发芽率、发芽势、根长和芽长以及超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的影响, 阐明其对环境胁迫因素的响应机制。2) 播期试验: 在河北坝上地区设置5个播期 (5月1日、5月11日、5月21日、6月1日和6月11日), 探究不同播期下环境温度和土壤水分变化对出苗率及产量的影响, 明确河北坝上冷凉地区藜麦高产的适宜种植时间。种子萌发试验结果表明: 随着温度的升高, 发芽率、发芽势、根长和芽长逐渐增加, 20 °C/10 °C 和 25 °C/15 °C 处理下种子萌发率较高。在干旱胁迫下, 种子萌发指标整体下降。当干旱胁迫较轻 (PEG-6000 为 -0.3 MPa) 时, SOD 和 CAT 活性较高, 种子萌发受到的影响较小。田间试验结果表明: 随着播期推迟, 藜麦出苗期间温度和籽粒产量均呈先下降后上升再下降的趋势, 以6月1日播期处理最高。相关性分析表明, 出苗率与环境温度呈正相关, 产量与株数呈显著正相关。6月1日播期出苗期间的平均气温为 17.77 °C, 出苗率为 95.72%; 5月11日播期出苗期间的平均温度为 5.90 °C, 出苗率为 6.58%。与5月11日播期相比, 6月1日播期产量提高 435.67 kg·hm⁻²。以上结果表明, 藜麦种子能耐受一定程度的干旱胁迫, 但在低于 15 °C/5 °C 的温度下萌发表现较差。在河北坝上冷凉地区, 为确保藜麦的出苗率免受低温的负面影响, 不宜过早播种; 适宜播期在5月中旬到6月上旬, 以保证藜麦生长所需的适宜温度。此结果可为优化坝上冷凉地区藜麦种植管理提供科学依据。

关键词: 藜麦; 播期; 干旱胁迫; 温度; 产量

中图分类号: S519

Effects of water and temperature on seed germination and grain yield of quinoa *

WANG Huili^{1,2}, ZHONG Yuanning², YANG Han², MA Yuzhao², QIAO Yunzhou², ZHANG Xiaoshuai³, HUANG Xinli³, DONG Baodi^{1,2**}

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Hebei Province, Shijiazhuang 050022, China; 3. Zhangjiakou Institute of High Efficiency in Agricultural Water-saving, Zhangjiakou 076450, China)

* 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900302, 2022YFD1300801) 和河北省重点研发计划项目 (21327004D) 资助

** 通信作者: 董宝娣, 主要研究方向为作物绿色高效用水。E-mail: dongbaodi@126.com

王慧丽, 主要研究方向为作物节水与抗逆丰产栽培。E-mail: wanghuili25@163.com

收稿日期: 2024-02-01 接受日期: 2024-04-08

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2022YFD1900302, 2022YFD1300801), and the Key Research and Development Program of Hebei Province (21327004D).

** Corresponding author, E-mail: dongbaodi@126.com

Received Feb. 1, 2024; accepted Apr. 8, 2024

<http://www.ecoagri.ac.cn>

Abstract: Quinoa is a dryland crop that is rich in nutrients and prefers coolness. The emergence rate is one of the main factors affecting yield of crops. Temperature and water availability are necessary conditions that affect seed germination and growth of crops. Therefore, it is important to study quinoa's emergence, field growth, and development under temperature and drought stress to achieve high-yield and high-efficiency quinoa cultivation. This study used the typical quinoa variety 'Jili 3' in the Bashang area of Hebei Province as the experimental material. 1) Seed germination test: three drought stress treatments (osmotic potential of PEG-6000 solution was 0, -0.3, and -0.6 MPa, respectively) and four day/night temperatures (10 °C/0 °C, 15 °C/5 °C, 20 °C/10 °C, and 25 °C/15 °C). The effects of drought and temperature stress and their interactions on the seeds germination rate and germination potential, seedling root length, shoot length, superoxide dismutase (SOD) activity, and catalase (CAT) activity were analyzed, and the response mechanism to environmental stress was clarified. 2) Sowing date test: five sowing dates of May 1, May 11, May 21, June 1, and June 11 were set up to explore the effects of different sowing dates on seed emergence rate and yield and to clarify the suitable planting time for high yield of quinoa in the cold area of Bashang, Hebei Province. The results of the seed germination test showed that the germination rate, germination potential, root length, and bud length increased gradually with the increase in temperature, and the seed germination rate was higher at 20 °C/10 °C and 25 °C/15 °C. The seed germination index decreased under drought-stress conditions. When the drought stress was light (PEG-6000 was -0.3 MPa), the activities of SOD and CAT were higher; and seed germination was less affected. The results of the sowing date test showed that with a delay in the sowing date, the temperature and grain yield of quinoa during seed emergence first decreased, then increased, and then decreased, with the highest temperature and grain yield on sowing date of June 1. Correlation analysis showed that the emergence rate was positively correlated with ambient temperature, and yield was significantly positively correlated with the number of plants. The average temperature during the emergence period of the sowing date of June 1 was 17.77 °C, and the emergence rate was 95.72%. The average temperature during the emergence period of the sowing date of May 11 was 5.90 °C, and the emergence rate was 6.58%. Compared with the sowing date of May 11, the yield of June 1 increased by 435.67 kg·hm⁻². The above results showed that quinoa seeds could tolerate a certain degree of drought stress, but the germination performance was poor at temperatures below 15 °C/5 °C. In the cold areas of Bashang, it is not advisable to sow too early to ensure that the emergence rate of quinoa is not negatively affected by low temperatures. The most suitable sowing date was from mid-May to early June to ensure a suitable temperature for the growth of quinoa. The results provide a scientific basis for optimizing the management of quinoa planting in the cold areas of Bashang.

Keywords: quinoa; sowing date; drought stress; temperature; yield

藜麦 (*Chenopodium quinoa*) 为一年生双子叶植物, 原产于安第斯山脉。因其富含优质蛋白、多种维生素、矿物质以及人体所必需的 9 种氨基酸, 被联合国粮农组织 (FAO) 认定为可满足人体基本需求的唯一的单体植物, 并将 2013 年定为“国际藜麦年”。藜麦能适应干旱、寒冷等多种不良环境, 其因优良的营养品质和生物学特性已成为当前研究的热点。然而, 藜麦的生长发育及产量受到多种环境因素的限制, 如干旱和低温条件会严重影响种子的正常萌发, 导致出苗率降低、产量下降, 严重限制了藜麦的发展^[1-3]。

逆境条件下出苗率的多少对作物产量起决定性作用, 而萌发期是作物对逆境最敏感的时期。干旱作为最具影响力的环境因子, 对作物生长的限制超过任何环境因子^[4]。干旱胁迫下种子萌发^[5]、根系生长^[6]等都会受到影响, 同时也会通过改变其体内的渗透调节物质含量和抗氧化酶活性等, 提高对干旱的适应性^[7]。温度也是不可忽视的重要环境因子^[8-9], 温度过低抑制酶活性、降低种子呼吸速率等影响种子萌发^[10], 严重影响出苗率进而影响后期产量^[11-12]。适宜的温度能提高发芽率^[13], 加快种子萌发速率^[14], 改

变细胞酶活性^[15]。因此, 为提高逆境胁迫下藜麦的出苗率^[16], 农业生产中常常通过调整播期来改善作物的出苗情况。

播期调整是通过充分利用气候条件的优势, 为种子的萌发和生长提供适宜的环境条件^[17], 是提高有限环境下作物出苗率的有效措施。合理选择播种时间, 可以避开极端温度和水分条件, 提高出苗均匀度。近年来在全国各地开展了藜麦播期的研究。温度较高的云南低海拔地区藜麦种植需推迟播期以避开高温季节^[18]; 吉林白城地区, 随着播期推迟, 藜麦生育期缩短^[19]; 浙江庆元 7 月之前播种受低温和降雨的影响, 幼苗生长不良, 缺株严重, 适宜播期在 7 月中旬和 8 月中旬^[20]。河北坝上地区无霜期约 90 d, 9 月中上旬即出现早霜, 影响作物产量。因此探寻最佳播期对于河北坝上地区藜麦高产具有重要意义。然而, 尽管调整播期可以改善出苗问题^[21], 但在不同播期下, 作物面临的环境条件和生长周期存在差异。这可能导致生长发育受到限制, 影响产量的形成^[22]。因此, 需要深入研究作物萌发所需的水分和温度条件, 分析播种日期对作物产量的影响机制, 以寻找解决方案, 平衡出苗率和产量之间的关系。本试验通过设

置不同温度和水分条件来模拟不同环境条件,观察藜麦种子的发芽率等指标,并分析种子萌发过程中抗氧化酶活性的变化;同时进一步比较田间不同播期温度和水分对出苗率和产量的影响。旨在探究低温和水分对藜麦种子萌发、生长及产量的影响,探明河北坝上冷凉地区藜麦种植的适宜播期,为坝上冷凉地区藜麦扩大种植和优质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

种子萌发试验于2022年3—4月在中国科学院栾城农业生态系统试验站(37°53'N, 114°41'E; 海拔50.1 m)人工气候室中进行。田间播期试验于2022年4—10月在张家口市农业高效节水研究所(41°20'N, 114°68'E; 海拔约1 400 m)进行,试验地属于温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温3.6℃,平均降水量384 mm。试验区土壤有机质含量为30.3 g·kg⁻¹,全氮1.7 g·kg⁻¹,速效磷55 mg·kg⁻¹,速效钾272 mg·kg⁻¹,缓效钾617.0 mg·kg⁻¹;0~20 cm田间持水量为19.86%。2022年藜麦全生育期内温度和降雨量如图1所示。

1.2 试验设计

供试材料选用坝上地区主栽矮秆白藜麦品种‘冀藜3号’。该品种由张家口市农业科学院选育^[23],籽粒呈白色,扁圆柱形,属于早熟品种,抗倒伏性能强。

1.2.1 种子萌发试验

设置温度和干旱胁迫处理。温度(昼温/夜温,12 h/12 h)设10℃/0℃(T1)、15℃/5℃(T2)、20℃/10℃(T3)和25℃/15℃(T4)4个梯度,用不同渗透势的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫,设无胁迫0(CK)、中度胁迫-0.3 MPa(D1)和重度胁迫-0.6 MPa(D2)。每个处理5次重复。挑选籽粒饱满、大小均匀的藜麦种子,用2.0%次氯酸钠溶液消毒15 min,无菌水冲洗

干净后晾干备用。将种子均匀摆放在铺有两层滤纸、直径为10 cm的培养皿中,每皿50粒种子,分别加入10 mL相应浓度的PEG-6000溶液,以加入蒸馏水作为对照。置于根据处理设置不同温度的智能温控人工气候室中培养,及时清理发霉的种子并记录总数。胚根长度≥2 mm为萌发标准,分别在第3天和第7天分别记录萌发情况。第7天用直尺测量其芽长和根长。采用称重法按蒸发量补充蒸馏水,保持滤纸水分饱和,连续7 d种子不再萌发即为试验终止。

1.2.2 田间播期试验

设置5个播期,分别为5月1日、5月11日、5月21日、6月1日和6月11日,每10 d一个播期。株距为30 cm,行距35 cm,小区面积32 m²(4 m×8 m),每个处理3次重复。于播种前施用微生物菌剂(有机质≥60%,氮磷钾6%~8%),采用平播方式,播后镇压。各小区的田间措施保持一致,统一按照一般大田管理。每个播期播种时采用烘干法进行土壤水分测定,记录各播期出苗期间(播种后5 d内)的平均温度,数据来自张家口市农业高效节水研究所气象场。收获日期分别为8月7日、8月13日、8月17日、8月22日和8月29日。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 发芽势和发芽率测定

$$\text{发芽势}(\%) = \frac{\text{第3天发芽种子数}}{\text{试供种子数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率}(\%) = \frac{\text{第7天发芽种子数}}{\text{试供种子数}} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.2 抗氧化酶活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用WST-8法^[24],过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法^[25]。所购试剂盒来自伊势久(江苏连云港)生物科技有限

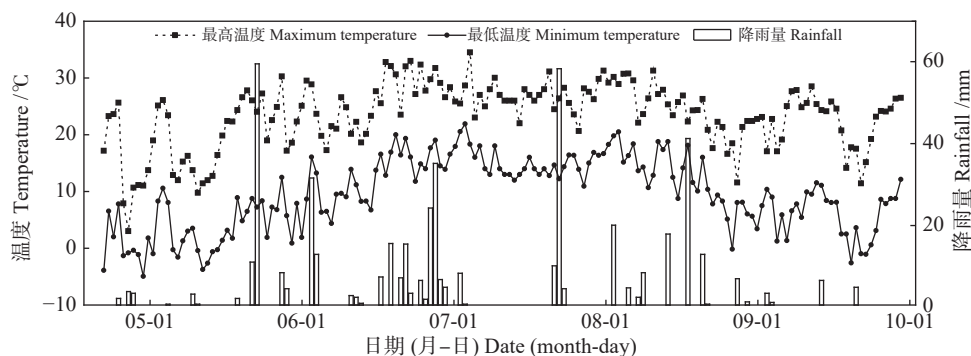


图1 2022年藜麦生育期最高、最低温度和降雨量

Fig. 1 The maximum temperature, minimum temperature and rainfall during quinoa growth period in 2022

责任公司。

1.3.3 土壤相对含水量测定

土壤质量含水量采取烘干法测定, 土壤深度为 20 cm, 每 10 cm 为一层, 3 次重复, 土壤质量含水量计算公式为:

$$\omega = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ω 表示质量含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); W_w 为湿土质量 (g); W_d 为烘干土质量 (g)。

土壤相对含水量(%) = (土壤质量含水量/田间持水量) $\times 100\%$ (4)

1.3.4 株高和茎粗测定

每个小区中选取藜麦 10 株, 用直尺在原位测量, 取平均值, 所测定株高均为自然株高; 用游标卡尺原位测量茎基部 (距地面 2 cm 处) 直径, 取平均值为茎粗。

1.3.5 产量及产量构成测定

藜麦叶片 80% 枯黄并有部分开始脱落, 籽粒达到蜡熟期时对各处理小区进行实打实收, 测定各处理的产量并折算成公顷产量, 千粒重和单穗粒重用称重法测定, 株数、有效分枝数用直接计数法测定。

1.4 数据处理

数据用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据统计分析, Origin 2022 作图, SPSS 26.0 软件对不同处理进行差异显著性分析, 使用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 温度和干旱胁迫下藜麦种子萌发及抗氧化防御机制

2.1.1 温度和干旱胁迫对藜麦种子萌发的影响

由图 2 和图 3 可知, 在不同渗透势处理下, 藜麦种子发芽势和发芽率均随温度的升高呈上升趋势。当 PEG-6000 渗透势相同时, 发芽势在 T3 处理下最高 (图 3a), 分别为 96.40% (CK)、94.40% (D1) 和 93.00% (D2); CK 和 D1 处理发芽率在 T4 最高 (图 3b)。T1 条件下 D1 处理对藜麦种子萌发有促进作用 (图 3a)。T3 和 T4 处理在 D1 和 D2 处理下的发芽率和发芽势相较于 CK 处理下降 2.05%~7.66%; 而 T1 和 T2 处理较 CK 处理下降幅度高于 10%, 且达显著水平 ($P < 0.05$)。说明低温下藜麦种子对于干旱胁迫较为敏感。

随着温度的升高, 藜麦根长整体呈逐渐增加趋势。与 CK 处理相比, 在 T1 和 T2 处理下 D1 和 D2 处理根长降低 4.49%~34.19%, T3 和 T4 处理降低 13.53%~



图 2 PEG-6000 溶液渗透势为 -0.3 MPa 时不同温度下藜麦种子萌发状况

Fig. 2 Germination of quinoa seeds at different day/night temperatures under -0.3 MPa osmotic formula of PEG-6000 solution

43.87%。随着 PEG-6000 渗透势的增加, 根长受抑制程度逐渐增加 (图 3c)。芽长变化规律与根长类似, 随着温度的升高, CK 和 D1 处理下, 芽长整体呈逐渐升高趋势, D2 处理下芽长逐渐下降 (图 3d)。

2.1.2 温度和干旱胁迫对藜麦抗氧化酶活性的影响

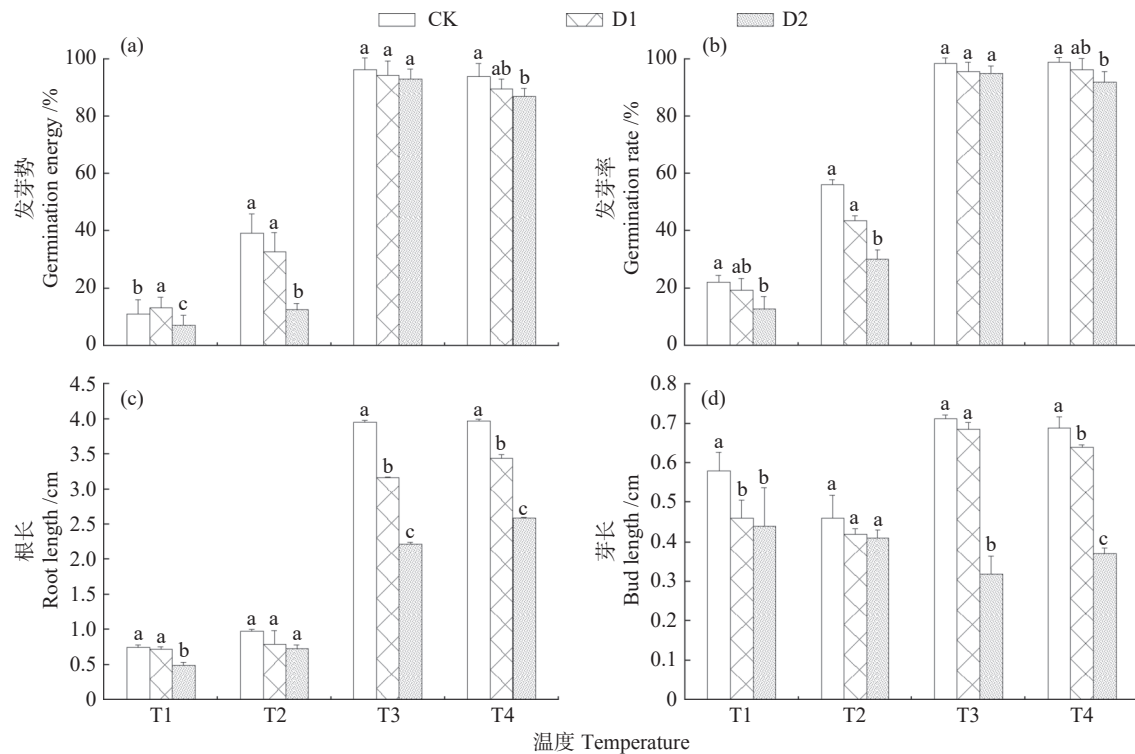
由图 4a 可知, 随着温度的上升, 藜麦种子的 SOD 活性在 CK 处理下呈逐渐下降趋势, 在 T1 处理时达到最大值; D1 和 D2 处理下呈先上升后下降的趋势, T2 处理下达到最大值, 分别为 269.24 和 $200.50 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。除 T1 处理外, 其他处理在相同温度下 SOD 活性随 PEG-6000 渗透势的增加先增大后减小。

由图 4b 可知, 相同 PEG-6000 渗透势处理下, 随着温度的升高, CAT 活性呈先上升后下降趋势; T3 处理下 CK 和 D1 处理的 CAT 活性高于其他温度; T2 处理下 D2 处理 CAT 活性最大。在相同温度下, 除 T2 处理外, CAT 活性随着 PEG-6000 渗透势的增加先上升后降低, 在 D1 处理下达最大。

2.2 播期对藜麦出苗及产量的影响

2.2.1 不同播期温度和土壤水分状况及对藜麦出苗率的影响

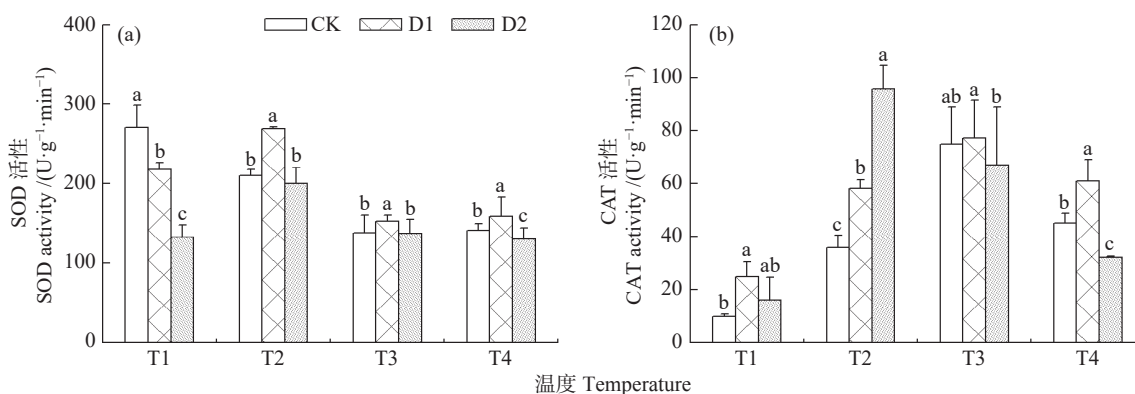
由表 1 可知, 不同播期气温变化范围为 $5.90 \sim 17.77 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 地温为 $1.80 \sim 13.26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 而土壤相对含水量为 $61.17\% \sim 72.64\%$ 。温度和水分随播期推迟逐渐升高, 5 月 21 日至 6 月 11 日温度为 $15 \sim 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 土壤相对含水量 $> 60\%$ 。出苗率随温度的增加逐渐增加, 在 6 月 1 日时达最大 95.72% , 此时的气温为 $17.77 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 土壤相对含水量为 62.16% , 与种子萌发 T3 处理 ($20 \text{ }^{\circ}\text{C} / 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 最高一致。由图 5 可知, 气温、 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 地温



T1-T4 分别表示昼/夜温度为 10 °C/0 °C、15 °C/5 °C、20 °C/10 °C 和 25 °C/15 °C; CK、D1 和 D2 表示 PEG-6000 渗透势为 0、-0.3 和 -0.6 MPa。不同小写字母表示相同温度不同 PEG-6000 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T1-T4 represent the day/night temperature of 10 °C/0 °C, 15 °C/5 °C, 20 °C/10 °C and 25 °C/15 °C, respectively. CK, D1 and D2 represent the PEG-6000 osmotic potential of 0, -0.3 and -0.6 MPa, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different PEG-6000 treatments at the same temperature at $P < 0.05$ level.

图 3 温度和 PEG-6000 处理对藜麦种子萌发特性的影响

Fig. 3 Effects of temperature and PEG-6000 treatment on germination characteristics of quinoa seeds



T1-T4 分别表示昼/夜温度为 10 °C/0 °C、15 °C/5 °C、20 °C/10 °C 和 25 °C/15 °C; CK、D1 和 D2 表示 PEG-6000 渗透势为 0、-0.3 和 -0.6 MPa。不同字母表示相同温度下不同 PEG-6000 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T1-T4 represent the day/night temperature of 10 °C/0 °C, 15 °C/5 °C, 20 °C/10 °C and 25 °C/15 °C, respectively. CK, D1 and D2 represent the PEG-6000 osmotic potential of 0, -0.3 and -0.6 MPa, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different PEG-6000 treatments at the same temperature at $P < 0.05$ level.

图 4 温度和 PEG-6000 处理对藜麦种子超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性的影响

Fig. 4 Effects of temperature and PEG-6000 treatment on activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (ACT) of quinoa seeds

与出苗率呈正相关关系, 相关系数分别为 0.74 和 0.72; 而土壤相对含水量与出苗率相关性为 0.12, 土壤相对含水量与出苗率相关性弱。因此, 在土壤相对含水量较高时 ($\geq 60\%$), 播种时的温度是影响出苗

率的主要因素。

2.2.2 不同播期对藜麦农艺性状及产量的影响

如表 2 所示, 随着播期逐渐推迟, 株高和茎粗整体呈减小趋势, 5 月 1 日播种的藜麦株高和茎粗均为

表 1 不同播期下藜麦出苗率、气温、0~20 cm 地温和土壤相对含水量

Table 1 Germination rates of quinoa, air temperatures, 0–20 cm soil temperatures and relative water contents under different sowing dates

播期(月-日) Sowing date (month-day)	气温 Temperature / °C	地温 Soil temperature / °C	土壤相对含水量 Soil relative water content / %	出苗率 Germination rate / %
05-01	11.81	7.69	68.35	6.47±0.83d
05-11	5.90	1.80	61.17	6.58±3.47d
05-21	16.23	12.10	71.11	29.72±4.33c
06-01	17.77	13.26	62.16	95.72±11.37a
06-11	15.50	10.97	72.64	88.49±2.95b

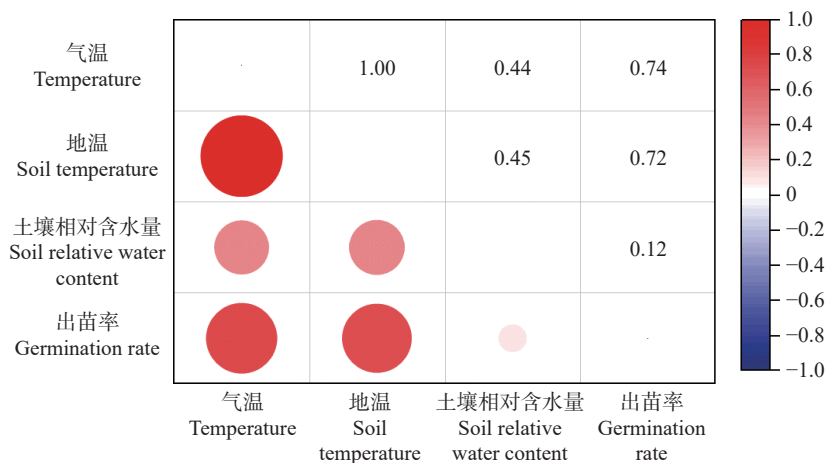


图 5 温度与土壤相对含水量和藜麦出苗率之间的关系

Fig. 5 Correlation among temperature, soil relative water content and germination rate of quinoa

表 2 不同播期下藜麦的农艺性状和产量

Table 2 Yields and yield components of quinoa sown in different dates

播期(月-日) Sowing date (month-day)	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem thick /cm	有效分枝数 Effective branch number	株数 Plants number /($\times 10^4$ plant·hm ⁻²)	千粒重 1000-seed weight /g	单穗粒重 Grain weight per spike /g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
05-01	121.00±6.87a	1.23±0.21b	11.33±0.71a	0.61±0.08d	3.08±0.22a	3.99±1.51a	301.23±7.52b
05-11	109.53±7.38b	1.45±0.06a	9.50±1.74ab	0.63±0.33d	3.46±0.12a	2.30±0.04ab	210.94±5.63c
05-21	73.04±4.67d	0.59±0.09d	3.50±0.80ab	2.82±0.41c	3.19±0.50a	2.70±0.66ab	302.55±21.20b
06-01	96.18±0.98c	0.83±0.02c	3.78±0.57ab	9.06±1.08a	3.47±0.07a	2.23±0.36ab	646.61±20.15a
06-11	64.86±5.08d	0.69±0.10cd	2.63±0.63b	8.41±0.28b	2.24±0.39b	1.58±0.40b	254.82±4.69bc
<i>F</i>	59.00***	29.90***	3.70	2.88***	8.14**	0.99	163.07***

同列不同小写字母表示不同播期处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。**和***表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different sowing dates at $P<0.05$ level. ** and *** indicate significant differences at $P<0.01$ and $P<0.001$ levels, respectively.

最大值, 分别为 121.00 cm 和 1.23 cm, 不同播期间差异极显著 ($P<0.001$)。在产量构成因素中, 有效分枝数随播期推迟整体呈逐渐减小趋势, 其中 5 月 1 日播期有效分枝数最大, 为 11.33 个; 6 月 11 日播期最少, 为 2.63 个。株数在播期为 6 月 1 日时达最大, 为 9.06 万株·hm⁻²。千粒重整体随播期推迟呈先增加后减小趋势, 5 月 1 日至 6 月 1 日播期千粒重为 3.0~3.5 g, 处理间差异不显著; 6 月 11 日播种藜麦千粒重最小 (2.24 g), 显著低于其他处理 ($P<0.05$)。单穗粒重为

1.58~3.99 g, 仅 6 月 11 日播期显著小于 5 月 1 日播期 ($P<0.05$), 其他播期间无显著差异。随着播期推迟, 藜麦产量呈先降低后升高再降低趋势, 6 月 1 日播种的藜麦产量相较于 5 月 1 日和 5 月 11 日播种产量分别提高 345.38 和 435.67 kg·hm⁻², 差异显著 ($P<0.05$)。

2.2.3 藜麦产量相关分析

由表 3 可知, 株高和茎粗呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与株数呈显著负相关 ($P<0.05$); 有效分枝数与

表 3 藜麦农艺性状与产量相关分析
Table 3 Correlation analysis between agronomic traits and yield of quinoa

	株高 Plant height	茎粗 Stem thick	有效分枝数 Effective branch number	株数 Plants number	千粒重 1000-seed weight	单穗粒重 Grains weight per spike
茎粗 Stem thick	0.81**					
有效分枝数 Effective branch number	0.48	0.27				
株数 Plants number	-0.59*	-0.58*	-0.34			
千粒重 1000-seed weight	0.46	0.28	0.06	-0.32		
单穗粒重 Grains weight per spike	0.24	0.22	0.30	-0.30	-0.02	
产量 Yield	-0.03	-0.29	0.01	0.62*	0.35	-0.23

*和**表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。* and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

株数呈负相关,与株高、茎粗呈正相关关系;千粒重与株数和单穗粒重呈负相关,与产量呈正相关关系;产量与株高和茎粗负相关,与株数呈显著正相关。

3 讨论

种子萌发是作物生长的重要环节,而水分和温度是影响这一环节的关键因素。种子需要足够的水分才能启动萌发,而温度的变化则会影响种子对水分的吸收以及酶活性等。在众多植物中,PEG 等渗透剂通过抑制种子对水分的吸收来延迟或阻碍种子萌发^[26]。本研究结果表明,随着温度的升高,藜麦种子的发芽率和发芽势呈升高趋势。在较高温度下(20 °C/10 °C、25 °C/15 °C),渗透势为-0.3 MPa 的 PEG-6000 胁迫,藜麦种子仍表现出较高的发芽率和发芽势,与对照组差异并不显著,说明藜麦种子具有一定的耐旱性,这与温日宇等^[27]研究结果基本一致。低温条件下,对照处理与胁迫处理间发芽势和发芽率差异较大,这可能是由于在低温环境下,细胞内的酶活性降低,种子更易进入休眠状态^[28],不利于其萌发;同时,高浓度 PEG-6000 胁迫对种子萌发抑制效果显著,抗氧化系统受损,植物生长受到阻碍。通常认为,根长和芽长是衡量植物萌发期抵御干旱能力强弱的重要指标之一。与对照组相比,高浓度的 PEG-6000 显著减小了植物的根长和芽长。在其他作物上,如玉米 (*Zea mays*)^[29]、谷子 (*Setaria italica*)^[30] 等也观察到了类似的现象。原因可能与溶质浓度增加有关,PEG-6000 渗透势增加导致细胞间的渗透势增大,高渗透压使植物失水并导致离子失衡以及分生组织活性降低,从而抑制植物生长。

植物在适宜的环境下细胞内活性氧 (ROS) 的产生和清除会维持在相对稳定的平衡状态,然而,当植物受到胁迫时,这种平衡被打破,自由基大量产生并破坏细胞膜。为应对这种压力,植物会启动体内的

抗氧化防御系统,如 SOD 将活性氧转化为 H_2O_2 , H_2O_2 又被 CAT 分解,从而保护植物免受氧化损伤^[31]。在本研究中,当种子受到干旱胁迫时, SOD 和 CAT 的活性会短暂上升,这表明在轻度干旱胁迫下,种子会依靠自身的防御系统来抵抗干旱胁迫,在适宜温度条件下展现出良好的活性氧清除能力。这与鞠乐等^[32]、宿婧等^[33]的研究结果一致,在小麦 (*Triticum aestivum*)^[34]、大豆 (*Glycine max*)^[35]、木薯 (*Manihot esculenta*)^[36] 等作物中也有关于温度和干旱胁迫提高抗氧化酶活性的报道。

产量是衡量作物抗逆性的关键指标,而出苗率是影响藜麦产量的重要因素。本试验中,所有播期处理的土壤相对含水量均较高(>60%),属于轻度干旱胁迫或无胁迫^[37],干旱胁迫不是影响出苗率的主要因素。调整播期是提高出苗率的有效策略。早播藜麦的株数明显减小,进而导致产量降低,与唐峻岭等^[38]研究结果一致。这是由于早播温度低,造成出苗困难。但与任永峰等^[39]早播提高藜麦产量的研究结果相反,这可能是不同地域藜麦生育阶段温度、品种等差异所导致的。5月1日播种藜麦产量高于5月11日,这是由于5月1日播种时地温和气温高于5月11日播种,出苗率较高,从而获得较高的产量;而5月21日与6月1日温度基本一致,但出苗率差异较大,可能是由于5月21日播种后降雨过多,长时间积水,影响了藜麦出苗。本研究结果表明,适宜播期有利于提高藜麦产量,优化产量构成,可能与环境温度有关。适当地调整播期可以避免苗期低温,为种子萌发提供更适宜的温度和水分条件,从而促进种子萌发和生长,增加出苗率,进而提高产量。除此之外,产量的增加可能还与生长周期、生育期积温等因素相关。播期过晚可能会导致作物生长周期缩短,致使早霜来临之前不能成熟,影响养分的积累和籽粒的形成,从而影响产量提高^[40-41]。

4 结论

温度和水分对藜麦种子萌发和籽粒产量具有显著影响。昼/夜温度低于 15 °C/5 °C, 藜麦种子的萌发能力较差, 发芽率和发芽势均较低; 昼/夜温度为 20 °C/10 °C 和 25 °C/15 °C 时, 环境温度处于藜麦种子萌发的适宜范围内, 为种子萌发创造了有利生长环境。在中度干旱胁迫下, 种子的抗氧化酶活性较高, 种子萌发受影响的程度较小。本研究条件下, 土壤相对含水量高于 60%, 温度是影响藜麦产量的重要因素。随着播期推迟, 藜麦籽粒产量呈先下降后上升再下降的趋势, 于 6 月 1 日达到峰值。相关性分析表明, 藜麦出苗率与环境温度密切相关, 产量与株数呈显著正相关。尽管早播藜麦在株高、茎粗、单穗粒重等方面有所提升, 但无法弥补出苗率下降带来的负面影响, 导致产量较低。因此, 在河北坝上冷凉地区, 为避免低温对藜麦出苗率造成不利影响, 播种时间不宜过早。适宜播期在 5 月中旬至 6 月上旬, 此阶段播种藜麦出苗期间的气温在 15 °C 以上, 地温高于 10 °C, 出苗率和产量显著提高。

参考文献 References

- [1] 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, 2
REN Y F, WANG Z M, ZHAO P Y, et al. Ecological adaptability of quinoa in northern foot of Yinshan in Inner Mongolia[J]. Crops, 2016(2): 79–82, 2
- [2] BOIS J F, WINKEL 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[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(4): 299–308
- [3] 曲波, 张谨华, 王鑫, 等. 温度和光照对藜麦幼苗生长发育的影响[J]. *农业工程*, 2018, 8(7): 128–131
QU B, ZHANG J H, WANG X, et al. Effects of temperature and light on growth and development of quinoa seedlings[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(7): 128–131
- [4] CATTIVELLI L, RIZZA F, BADECK F W, et al. Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics[J]. *Field Crops Research*, 2008, 105(1/2): 1–14
- [5] 张翠梅, 师尚礼, 刘珍, 等. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系形态及解剖结构的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(5): 79–89
ZHANG C M, SHI S L, LIU Z, et al. Effects of drought stress on the root morphology and anatomical structure of alfalfa (*Medicago sativa*) varieties with differing drought-tolerance[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(5): 79–89
- [6] 吴雨涵, 刘文辉, 刘凯强, 等. 干旱胁迫对燕麦幼苗叶片光合特性及活性氧清除系统的影响[J]. *草业学报*, 2022, 31(10): 75–86
WU Y H, LIU W H, LIU K Q, et al. Effects of drought stress on leaf senescence and the active oxygen scavenging system of oat seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(10): 75–86
- [7] 杨利艳, 杨小兰, 朱满喜, 等. 干旱胁迫对藜麦种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *种子*, 2020, 39(9): 36–40
YANG L Y, YANG X L, ZHU M X, et al. Effects of drought stress on seed germination and seedling physiological characteristics of quinoa[J]. *Seed*, 2020, 39(9): 36–40
- [8] THOMPSON K, GRIME J P, MASON G. Seed germination in response to diurnal fluctuations of temperature[J]. *Nature*, 1977, 267: 147–149
- [9] LIU K, BASKIN J M, BASKIN C C, et al. Effect of diurnal fluctuating versus constant temperatures on germination of 445 species from the eastern Tibet Plateau[J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e69364
- [10] SONG S Q, FREDLUND K, MOLLER I. Effects of temperature on germination rate and mitochondrial activity in *Beta vulgaris* L. seeds[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2002, 41(1): 59–63
- [11] JI H T, XIAO L J, XIA Y M, et al. Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 243: 33–42
- [12] ZHAO C, LIU B, PIAO S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(35): 9326–9331
- [13] 王玉峰. 温度对植物种子萌发机制的影响[J]. *防护林科技*, 2015(6): 76–78
WANG Y F. Effect of temperature on germination mechanism of plant seeds[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2015(6): 76–78
- [14] 汪建军, 麻安卫, 汪治刚, 等. 不同温度和 PEG 处理对中华羊茅种子萌发的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(4): 73–80
WANG J J, MA A W, WANG Z G, et al. Effects of different temperature and moisture conditions on seed germination of *Festuca sinensis*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(4): 73–80
- [15] AGUILAR P C, JACOBSEN S E. Cultivation of quinoa on the Peruvian Altiplano[J]. *Food Reviews International*, 2003, 19(1/2): 31–41
- [16] GARCIA CARDENAS G, MAGALI D, HERBAS C. Agroclimatic study and drought resistance analysis of quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano[D]. Leuven: University of Leuven, 2003
- [17] SPINK J H, SEMERE T, SPARKES D L, et al. Effect of sowing date on the optimum plant density of winter wheat[J]. *Annals of Applied Biology*, 2000, 137(2): 179–188
- [18] 环秀菊, 孔治有, 张慧, 等. 海拔和播期对藜麦主要品质性状的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(2): 258–262
HUAN X J, KONG Z Y, ZHANG H, et al. Effect of altitude and sowing date on main quality properties of quinoa[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(2): 258–262
- [19] 田娟, 张曼, 孙墨可, 等. 白城地区播期和播量对藜麦农艺性状和产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(24): 39–42
TIAN J, ZHANG M, SUN M K, et al. Effects of sowing date and sowing rate on agronomic characters and yield of quinoa in

- Baicheng area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(24): 39–42
- [20] 陈奕浪, 范道付, 吴应齐, 等. 播期对藜麦农艺性状及产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(8): 1492–1496
- CHEN Y L, FAN D F, WU Y Q, et al. Effect of sowing date on agronomic characteristics and yield of quinoa[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(8): 1492–1496
- [21] LU H D, XUE J Q, GUO D W. Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 227–235
- [22] RISI J, GALWEY N W. Effects of sowing date and sowing rate on plant development and grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in a temperate environment[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1991, 117(3): 325–332
- [23] 白静, 周海涛, 奚玉银. 藜麦新品种冀藜3号和冀藜4号栽培技术要点[J]. *现代农村科技*, 2020(9): 125, 3
- BAI J, ZHOU H T, XI Y Y. Key cultivation techniques of new quinoa varieties Jili No. 3 and Jili No. 4[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(9): 125, 3
- [24] UKEDA H, KAWANA D, MAEDA S, et al. Spectrophotometric assay for superoxide dismutase based on the reduction of highly water-soluble tetrazolium salts by xanthine-xanthine oxidase[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1999, 63(3): 485–488
- [25] 杨兰芳, 庞静, 彭小兰, 等. 紫外分光光度法测定植物过氧化氢酶活性[J]. *现代农业科技*, 2009(20): 364–366
- YANG L F, PANG J, PENG X L, et al. Measurement of catalase activity in plants by ultraviolet spectrophotometry[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(20): 364–366
- [26] MIRANDA R D Q, CORREIA R M, DE ALMEIDA-CORTEZ J S, et al. Germination of *Prosopis juliflora* (Sw.) D. C. seeds at different osmotic potentials and temperatures[J]. *Plant Species Biology*, 2014, 29(3): E9–E20
- [27] 温日宇, 刘建霞, 张珍华, 等. 干旱胁迫对不同藜麦种子萌发及生理特性的影响[J]. *作物杂志*, 2019(1): 121–126
- WEN R Y, LIU J X, ZHANG Z H, et al. Effects of drought stress on germination and physiological characteristics of different quinoa seeds[J]. *Crops*, 2019(1): 121–126
- [28] 张佳宁, 刘坤. 植物调节萌发时间和萌发地点的机制[J]. *草业学报*, 2014, 23(1): 328–338
- ZHANG J N, LIU K. Mechanisms for plants detecting the optimum time and place to germinate[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(1): 328–338
- [29] 李婉玲, 陈晓龙, 蔡立群, 等. PEG模拟干旱胁迫对玉米种子萌发的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(5): 32–41
- LI W L, CHEN X L, CAI L Q, et al. Effects of PEG simulated drought stress on maize seed germination[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(5): 32–41
- [30] 裴帅帅, 尹美强, 温银元, 等. 不同品种谷子种子萌发期对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价[J]. *核农学报*, 2014, 28(10): 1897–1904
- PEI S S, YIN M Q, WEN Y Y, et al. Physiological response of foxtail millet to drought stress during seed germination and drought resistance evaluation[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(10): 1897–1904
- [31] IQBAL H, YANING C, WAQAS M, et al. Hydrogen peroxide application improves quinoa performance by affecting physiological and biochemical mechanisms under water-deficit conditions[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(6): 541–553
- [32] 鞠乐, 齐军仓, 陈培育, 等. 干旱胁迫对大麦种子萌发、幼苗生长及生理特性的影响[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(8): 1879–1886
- JU L, QI J C, CHEN P Y, et al. Effects of drought stress on seed germination, seedling growth and physiological characteristics of barley[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(8): 1879–1886
- [33] 宿婧, 史晓晶, 梁彬, 等. 干旱胁迫对藜麦种子萌发及生理特性的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2019, 34(6): 928–932
- SU J, SHI X J, LIANG B, et al. The effect of drought stress on the seed germination and physiological characteristics of quinoa[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2019, 34(6): 928–932
- [34] TABARZAD A, AYOUBI B, RIASAT M, et al. Perusing biochemical antioxidant enzymes as selection criteria under drought stress in wheat varieties[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(17): 2413–2420
- [35] XU C S, XIA C, XIA Z Q, et al. Physiological and transcriptomic responses of reproductive stage soybean to drought stress[J]. *Plant Cell Reports*, 2018, 37(12): 1611–1624
- [36] ZHU Y M, LUO X L, NAWAZ G, et al. Physiological and biochemical responses of four cassava cultivars to drought stress[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6968
- [37] 李亚妮, 庞春花, 张永清, 等. 施氮深度和水分胁迫对藜麦幼苗生理及产量的影响[J]. *广西植物*, 2022, 42(7): 1222–1231
- LI Y N, PANG C H, ZHANG Y Q, et al. Effects of nitrogen fertilization depth and water stress on quinoa seedling physiological characteristics and yield[J]. *Guihaia*, 2022, 42(7): 1222–1231
- [38] 唐峻岭, 赵军, 李斌, 等. 播期对藜麦农艺性状及产量的影响[J]. *农业科技与信息*, 2021(14): 13–15
- TANG J L, ZHAO J, LI B, et al. Effect of sowing date on agronomic traits and yield of quinoa[J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2021(14): 13–15
- [39] 任永峰, 梅丽, 杨亚东, 等. 播期对藜麦农艺性状及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 643–656
- REN Y F, MEI L, YANG Y D, et al. Effects of sowing time on agronomic characteristics and yield of quinoa[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 643–656
- [40] RAHMAN M M, HAMPTON J G, HILL M J. The effect of time of sowing on soybean seed quality[J]. *Seed Science and Technology*, 2005, 33(3): 687–697
- [41] TSIMBA R, EDMENDES G O, MILLNER J P, et al. The effect of planting date on maize: Phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 145–155