

抗旱性藜麦幼苗对干旱胁迫的生理响应

高艳梅¹ 冯鹏睿¹ 陈薇薇¹ 张萌¹ 张永清^{1,2}

(¹山西师范大学生命科学学院, 030031, 山西太原; ²山西师范大学地理科学学院, 030031, 山西太原)

摘要 为研究抗旱性藜麦幼苗对干旱胁迫的响应, 选取强抗旱型藜麦品种陇藜 1 号 (LL1) 和新育品系 LQ18 作为试验材料, 利用聚乙二醇 6000 (PEG-6000) 溶液模拟干旱环境, 设置正常灌水 (CK)、轻度干旱胁迫 (5% PEG-6000) 和重度干旱胁迫 (20% PEG-6000) 3 个处理, 考察了藜麦种子的发芽率、发芽势和发芽指数, 幼苗株高、叶面积和根长, 地上及地下部干重, 可溶性蛋白和脯氨酸含量, 超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性及丙二醛 (MDA) 含量。结果表明, 重度干旱胁迫降低了 2 个品种 (系) 的株高、叶面积和地上部干重, 但提高了根长、地下部干重和根冠比。其中, LQ18 的叶面积和地上部干重降幅, 以及根长、地下部干重和根冠比增幅均小于 LL1。干旱胁迫下 LL1 的可溶性蛋白含量逐渐降低, 但 LQ18 的可溶性蛋白含量先升高后降低直至与 CK 无显著差异。重度干旱胁迫下 2 个品种 (系) 的脯氨酸含量均显著升高, 且 LQ18 的脯氨酸含量显著高于 LL1。干旱胁迫影响了 2 个品种 (系) 的 SOD、POD 活性并提高了 MDA 含量, 重度干旱胁迫下 LQ18 的 SOD 活性略有下降, 但其 POD 活性显著提高, 且 MDA 含量显著低于 LL1。

关键词 藜麦; 干旱胁迫; 种子萌发; 幼苗生长; 生理特性

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.) 作为一种兼具高营养价值与多重健康效益的作物, 近年来在全球农业及食品科学领域受到广泛关注^[1]。其籽粒富含不饱和脂肪酸、多种维生素、叶酸以及限制性氨基酸, 如甲硫氨酸、苏氨酸、赖氨酸和色氨酸等, 可满足人体对必需氨基酸的需求^[2]。此外, 藜麦展现出极强的环境适应力与抗逆性, 能够在寒冷、干旱、低温及盐碱等恶劣条件下生存^[3]。我国北方地区约 1/3 的区域属于干旱区, 干旱缺水问题严重制约作物产量的提升^[4]。为顺应国家农业发展规划, 推进杂粮产业培育, 山西省大力发展地方特色农业, 鉴于藜麦卓越的营养品质与良好的农业环境适应性, 其已成为推动当地作物结构优化、增强农产品有效供给、发展旱地农业以及助力精准扶贫的关键优势作物^[4]。然而, 当前藜麦生产主要依赖引种, 针对其生长习性、发育规律及抗逆机制等方面的研究相对较少, 品种优化培育未得到重视, 对藜麦各项生理指标的认知也尚不全面。因此, 深入探究藜麦的生理过程, 对于选育优质、高产且抗逆性强的藜麦新品种具有重要意义。

藜麦可通过多种形态结构与生理途径适应干

旱胁迫^[5]。根系作为植物与土壤进行水分及营养物质交换的关键器官, 在抵御干旱导致的水分散失方面发挥着重要作用, 在干旱条件下, 藜麦植株会形成庞大、分支繁多且深入土壤的根系结构^[6]。姚庆等^[7]研究表明, 藜麦的根长随着干旱胁迫程度的加剧逐渐增加。然而, 干旱环境也会导致藜麦叶面积减小、叶片萎蔫以及气孔快速关闭^[8]。Sun 等^[9]研究发现, 在干旱胁迫下, 藜麦通过增加叶片表面富含草酸钙的泡腺体, 进而减少蒸腾量, 导致地上部生物量降低。在干旱胁迫下, 植株体内会积累过量的活性氧 (ROS), 打破原有的动态平衡, 这些积累的 ROS 会引发膜脂质过氧化反应, 破坏植物的正常代谢, 严重时甚至导致细胞死亡^[10]。为维持正常的代谢功能, 植株会增强抗氧化酶系统的活性, 如超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD), 及时清除因逆境而增加的 ROS, 减轻氧化损伤^[11]。Zhu 等^[12]研究表明, 藜麦的 SOD 和 POD 活性随着干旱程度的加剧逐渐升高, 且抗旱强的品种表现出更高的 ROS 清除效率。同时, 植株还会通过产生有机和无机物质进行渗透调节, 包括可溶性糖、脯氨酸、甜菜碱、可溶性蛋白和

作者简介: 高艳梅, 主要从事藜麦逆境生理调控工作, E-mail: gaoyanmei0225@163.com; 冯鹏睿为共同第一作者, 主要从事植物生理、环境生态工程研究, E-mail: 15822095815@163.com

张永清为通信作者, 主要从事植物生理生态、植物营养和土壤学研究, E-mail: yqzhang208@126.com

基金项目: 山西省基础研究计划 (202303021212154); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2023-111); 山西省高等学校科技创新项目 (2022L259)

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-09-24; 网络出版日期: 2025-02-26

有机酸等有机小分子物质，以及钙、氯和钾等无机离子，它们能够降低细胞渗透压，提高细胞的保水和吸水能力，从而维持细胞活性，以适应干旱胁迫^[13]。朱丽丽等^[14]研究发现，在干旱胁迫增强的过程中，与膜脂过氧化相关的丙二醛（MDA）以及与渗透调节相关的脯氨酸（Pro）和可溶性蛋白（SP）含量均显著升高。鉴于此，本研究采用 PEG-6000 模拟干旱条件，对 2 个强抗旱型藜麦品种（系）幼苗的生长状况进行比较分析，并测定了可溶性蛋白、脯氨酸含量以及抗氧化酶活性等关键生理指标，旨在揭示藜麦幼苗抵御干旱胁迫的内在生理机制，为藜麦育种与干旱栽培技术提供理论依据，推动干旱地区农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为强抗旱型藜麦品种陇藜 1 号（LL1）和新育品系 LQ18，均由甘肃省农业科学院鉴定并提供。采用高渗溶液（PEG-6000）模拟干旱，土壤使用营养土，容器为一次性塑料杯。

1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发试验 选择大小一致、籽粒饱满且无病虫害的藜麦种子，采用 10% NaClO 溶液消毒 15 min，无菌水冲洗 3~5 次，吸干种子表面水分，放置于直径为 11 cm、垫有双层滤纸的一次性培养皿中，每皿 100 粒。培养皿中分别加入 10 mL 含 5% 和 20% 的 PEG-6000 溶液，模拟轻度和重度干旱胁迫，对照（CK）加入等量无菌水。每个处理重复 5 次。将培养皿置于 25 °C 的光照培养箱中，前 3 d 黑暗培养，之后光暗周期 16 h/8 h，共培养 7 d，每日更换 PEG-6000 溶液以维持干旱环境的稳定性。每隔 4 h 记录发芽种子的数量，直到剩余种子不再发芽。

1.2.2 幼苗生长试验 选择大小一致、籽粒饱满且无病虫害的藜麦种子，采用 10% NaClO 溶液消毒 15 min，无菌水冲洗 3~5 次。在室温约 25 °C 的黑暗环境下浸种 6 h。之后将种子均匀播种于高 9.5 cm 的一次性塑料杯中，并将其置于光照培养箱中，光照/黑暗：16 h/8 h，温度设置为 25 °C，每 2 d 浇 1 次无菌水。为保证幼苗正常生长，每周浇 1 次 Hoagland 营养液。分别在四叶一心和六叶一心时进行第 1 次和第 2 次间苗，每杯留苗 4 株。待幼苗长

至八叶一心时进行干旱胁迫，为模拟正常灌水、轻度干旱胁迫和重度干旱胁迫，每盆分别浇含 0%（CK）、5% 和 20% PEG-6000 的 Hoagland 营养液 150 mL。每个处理重复 5 次，胁迫 2 d 后取样测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 萌发指标 发芽率（%）=（萌发种子数/供试种子总数）×100；发芽势（%）=（第 3 天发芽种子数/供试种子总数）×100；发芽指数= $\sum G_t/t$ ，式中， G_t 为发芽种子数， t 为对应的萌发天数。

1.3.2 幼苗农艺性状 用直尺测量株高；采用 Delta-T SCAN 根系扫描仪（Delta-T Devices，英国）测定根长；采用 ImageJ 软件测量叶面积；将样品烘干后称量地上部和地下部的干重；计算根冠比：根冠比（%）=地下部干重/地上部干重×100。

1.3.3 幼苗生理指标 采用 NBT 显色法^[15]测定 SOD 活性；采用愈创木酚法^[16]测定 POD 活性；采用硫代巴比妥酸法^[17]测定 MDA 含量；采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[18]测定 SP 含量；采用茚三酮显色法^[19]测定 Pro 含量。

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据统计和作图，使用 SPSS 20.0 进行显著性分析（ $P < 0.05$ ）。

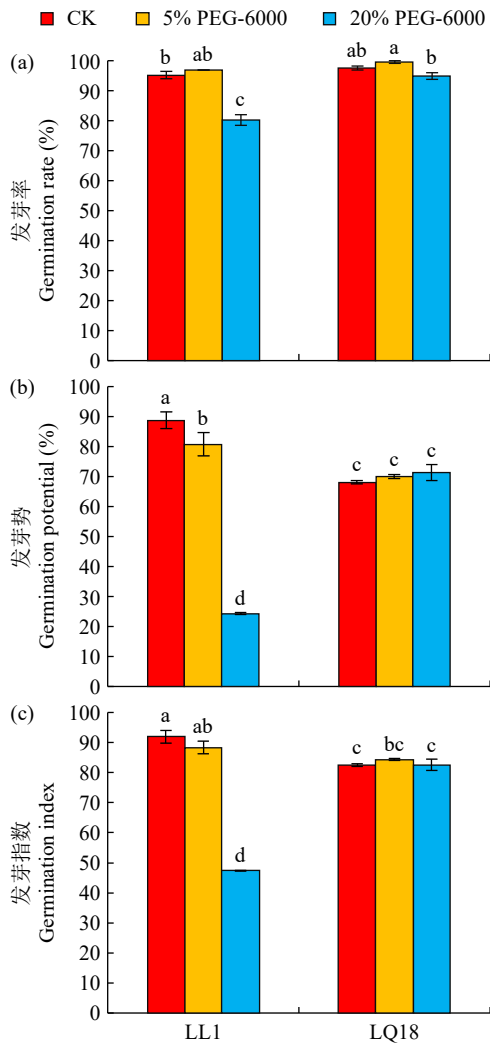
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对藜麦萌发期发芽率、发芽势和发芽指数的影响

随干旱胁迫程度增加，2 个藜麦品种（系）的发芽率均呈先升后降趋势（图 1a）。轻度干旱胁迫下 LL1 和 LQ18 的发芽率与 CK 相比均无显著差异，但在重度干旱胁迫下，LL1 的发芽率显著低于 CK，LQ18 与 CK 无显著差异。与 CK 相比，重度干旱胁迫下 LL1 的发芽势和发芽指数均显著下降，但不同干旱胁迫下 LQ18 的发芽势和发芽指数与 CK 相比均无显著差异（图 1b~c）。综上，与 CK 相比，LL1 的 3 个指标在重度干旱胁迫下均显著下降，而 LQ18 均无显著变化，说明 LQ18 抗旱性强于 LL1。

2.2 干旱胁迫对藜麦幼苗株高、叶面积和根长的影响

重度干旱胁迫下，2 个品种（系）的株高和叶面积均显著降低（表 1）。与 CK 相比，重度干旱胁迫下 LQ18 的株高降幅大于 LL1。LL1 和 LQ18



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 干旱胁迫对 2 个品种 (系) 藜麦发芽率、发芽势和发芽指数的影响

Fig.1 Effects of drought stress on germination rate, germination potential and germination index of two quinoa variety (line)

的叶面积在轻度干旱胁迫下分别下降了 24.69%和 21.65%; 在重度干旱胁迫下分别下降了 34.90%和 29.37%, LL1 的降幅大于 LQ18。2 个品种 (系)

表 1 干旱胁迫对 2 个品种 (系) 藜麦幼苗株高、叶面积和根长的影响

Table 1 Effects of drought stress on plant height, leaf area, and root length of two quinoa variety (line)

品种 (系) Variety (line)	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	叶面积 Leaf area (cm ²)	根长 Root length (cm)
LL1	CK	13.22±1.02a	22.92±6.04ab	18.64±0.79c
	5% PEG-6000	13.40±0.69a	17.26±4.99cd	21.70±1.81b
	20% PEG-6000	11.57±0.78b	14.92±3.43d	26.20±1.36a
LQ18	CK	9.41±0.84c	25.13±1.02a	16.49±0.40c
	5% PEG-6000	9.27±0.98c	19.69±3.34bc	18.77±0.47c
	20% PEG-6000	8.04±0.49d	17.75±2.86cd	22.31±1.86b

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

的根长与干旱胁迫程度成正比, 相较于 CK, 轻度和重度干旱胁迫下 LL1 的根长分别增加了 16.42%和 40.56%, LQ18 则分别增加了 13.83%和 35.29%, LL1 的增幅大于 LQ18。

2.3 干旱胁迫对藜麦幼苗生物量的影响

在干旱胁迫下, 2 个藜麦品种 (系) 的地上部干重逐渐减少, 而地下部干重则呈增加趋势 (表 2)。与 CK 相比, 在轻度和重度干旱胁迫下, LL1 的地上部干重分别减少了 30.43%和 39.13%, LQ18 则减少了 6.25%和 12.50%。LL1 的地下部干重在轻度和重度干旱胁迫下分别增加了 37.50%和 62.50%, LQ18 则分别增加了 6.25%和 31.25%。因此, LL1 的地上部干重降低幅度和地下部干重增加幅度均大于 LQ18。2 个藜麦品种 (系) 的总干重变化趋势与地上部干重变化趋势一致, 与 CK 相比, LL1 在轻度和重度干旱胁迫下总干重分别降低了 28.00%和 36.00%, LQ18 则分别降低了 5.56%和 11.11%。干旱胁迫增加了藜麦的根冠比, 2 个品种 (系) 均在重度干旱胁迫下达到最大值, 与 CK 相比, LL1 增加幅度 (164.70%) 大于 LQ18 (49.69%)。

表 2 干旱胁迫对 2 个品种 (系) 藜麦幼苗生物量的影响

Table 2 Effects of drought stress on the biomass of two quinoa variety (line) seedlings

品种 (系) Variety (line)	处理 Treatment	地上部干重 Aboveground dry weight (g)	地下部干重 Underground dry weight (g)	总干重 Total dry weight (g)	根冠比 Root-shoot ratio (%)
LL1	CK	0.23±0.02a	0.016±0.001bc	0.25±0.02a	7.11±0.01d
	5% PEG-6000	0.16±0.01ab	0.022±0.004a	0.18±0.00bc	14.50±0.03b
	20% PEG-6000	0.14±0.02c	0.026±0.003a	0.16±0.02bc	18.82±0.03a
LQ18	CK	0.16±0.00b	0.016±0.002c	0.18±0.00b	9.72±0.02cd
	5% PEG-6000	0.15±0.01ab	0.017±0.002bc	0.17±0.01bc	11.33±0.01bc
	20% PEG-6000	0.14±0.01ab	0.021±0.003ab	0.16±0.01c	14.55±0.01b

2.4 干旱胁迫对藜麦幼苗 SP 和 Pro 含量的影响

2 个藜麦品种 (系) 的 SP 含量呈现不同的变化趋势 (图 2a)。与 CK 相比, LL1 的 SP 含量随干旱程度增加呈逐渐降低的趋势, 其在轻度和重度干旱胁迫下分别减少了 19.86% 和 31.99%; 而 LQ18 的 SP 含量在轻度干旱胁迫下显著增加了 20.02%, 在重度干旱胁迫下无显著变化。LL1 和 LQ18 的 Pro 含量均随干旱程度增加而增加, 在重度干旱胁迫下达到最大值 (图 2b)。在轻度干旱胁迫下, LL1 和 LQ18 的 Pro 含量与 CK 差异均不显著, 但在重度干旱胁迫下, LL1 和 LQ18 显著增加, 且 LL1 显著小于 LQ18。

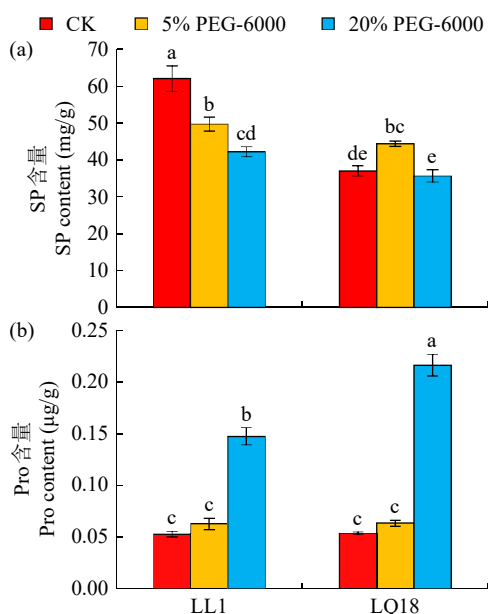


图 2 干旱胁迫对 2 个品种 (系) 藜麦幼苗 SP 和 Pro 含量的影响
Fig.2 Effects of drought stress on the contents of SP and Pro of two quinoa variety (line) seedlings

2.5 干旱胁迫对藜麦幼苗 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响

2 个藜麦品种 (系) 的 SOD 活性均呈先升后降的趋势 (图 3a)。当受到轻度干旱胁迫时, 与 CK 相比, LL1 和 LQ18 的 SOD 活性分别显著升高了 31.53% 和 11.77%; 在重度干旱胁迫下, LL1 显著升高了 22.65%, LQ18 则降低了 6.79%。LQ18 的 SOD 活性在各处理下均显著高于 LL1。LL1 和 LQ18 的 POD 活性呈现不同的变化趋势 (图 3b)。在轻度和重度干旱胁迫下, LL1 的 POD 活性显著上升, 与 CK 相比, 其增幅分别为 170.06% 和 215.01%。LQ18 的 POD 活性在轻度干旱胁迫下无

显著变化, 但在重度干旱胁迫下显著升高了 172.68%, 且显著高于 LL1。干旱胁迫下 2 个藜麦品种 (系) 的 MDA 含量均呈增加趋势 (图 3c)。与 CK 相比, LL1 在轻度和重度干旱胁迫下 MDA 含量分别升高了 45.95% 和 89.34%, LQ18 则分别升高了 38.37% 和 75.86%, LQ18 在各处理下均显著小于 LL1。

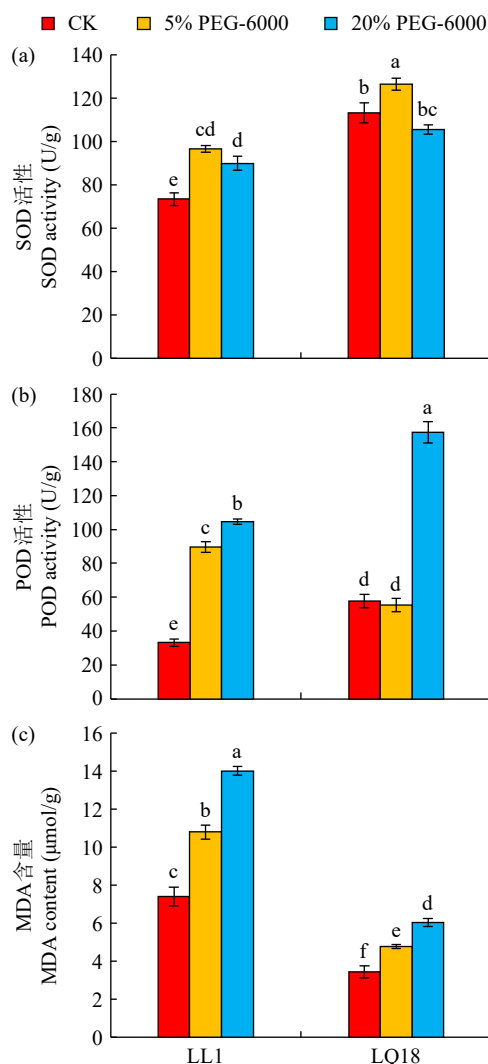


图 3 干旱胁迫对 2 个品种 (系) 藜麦幼苗 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响
Fig.3 Effects of drought stress on the SOD, POD activities and MDA content of two quinoa variety (line) seedlings

3 讨论

3.1 干旱胁迫对藜麦幼苗农艺性状的影响

植株为应对干旱胁迫会做出一系列反应, 直观地体现在生长特征上, 如株高和叶片的变化等^[20]。陇藜 1 号 (LL1) 是干旱试验中常用的抗旱品种, 本研究发现 2 个品种在轻度干旱胁迫下, 株高与

CK 均无显著差异；但随着干旱程度加剧，植株变矮小，叶片萎蔫，地上部干物质减少，表明干旱胁迫抑制了叶片气体交换，进而抑制有机物的合成与积累，影响植物正常生长，与诸多植物生理研究^[21-23]结论一致。同时，种子萌发试验显示，在不同干旱胁迫条件下，LQ18 的发芽率、发芽势和发芽指数均与 CK 无显著差异，进一步佐证了上述结论。

植物根系作为最早感知土壤水分亏缺的部位，在遭遇干旱和土壤贫瘠时会产生明显反应，以维持植物的正常生长发育^[24]。本研究发现，LL1 和 LQ18 的根系在干旱胁迫下均呈现正向生长，其中 LL1 的根长增幅显著大于 LQ18。刘文瑜等^[25]研究发现，LL1 在干旱胁迫下根长增幅最小，而本研究中 LQ18 的根长增幅显著小于 LL1，表明 LQ18 在干旱条件下具有更好的适应性。干旱胁迫会促使植株根系向土壤深处延伸，以获取更多水分，满足其生长发育需求。

地上部与地下部干重的变化揭示了藜麦在干旱胁迫下资源分配策略的调整。植物在受到逆境胁迫时，通常会优先减少地上部生长，促进地下部生长，将更多生物量分配给根系，增加根冠比，以确保基本生存资源的获取^[26]。LL1 和 LQ18 均表现出地上部干重减少、地下部干重增加的趋势，但 LQ18 的地下部干重小于 LL1，反映出 2 种抗旱性藜麦在强化根系发育以应对水分吸收不足方面存在适应性差异。根冠比的变化进一步凸显了根系在干旱适应性中的关键作用^[27]。LL1 在干旱胁迫下根冠比显著增加，尤其在重度胁迫下，表明其通过增强根系生长提高水分吸收能力。相比之下，LQ18 的根冠比在重度干旱胁迫下有所增加，但在轻度胁迫下与 CK 无显著差异。魏志敏等^[28]研究表明，抗旱能力更强的藜麦品种（系）其根冠比增幅相对较小，这进一步证实了 LQ18 具有更强的抗旱性。藜麦通过发展较长的根系以扩大吸水面积，能够在一定程度上抵御干旱胁迫，平衡地上与地下部分的生长。

3.2 干旱胁迫对藜麦幼苗生理特性的影响

MDA 作为叶片脂质过氧化的产物之一，常被用作评估植物对环境胁迫反应的关键指标^[29]。当植株遭受逆境胁迫时，膜脂过氧化程度加剧，导致 MDA 含量逐步上升^[30]。本研究发现，2 个藜麦

品种（系）的 MDA 含量均随干旱胁迫程度的加深而显著增加，但 LQ18 在相同胁迫条件下 MDA 含量较低，表明其具有较高的抗旱能力和更有效的细胞保护机制。SOD 和 POD 是抗氧化酶系统的重要组成部分。在干旱胁迫下，植物常通过调节抗氧化酶活性来激活抗氧化防御机制，进而提升对干旱环境的适应能力^[31]。SOD 作为酶促防御机制中的“第一道防线”^[32]，在轻度干旱胁迫下，LL1 和 LQ18 的 SOD 活性均显著提升；但在重度干旱胁迫下，二者活性均有所下降，这与李伟成等^[33]的研究结论一致。重度干旱胁迫下，LQ18 的 SOD 活性虽有所降低，但其 POD 活性却显著提升。这表明 LQ18 在应对极端环境时，倾向于通过增强 POD 活性来清除过量的活性自由基，减轻氧化应激对细胞的损伤，从而提升其抗旱能力。此外，LL1 的抗氧化酶活性整体低于 LQ18，这一发现揭示了不同藜麦品种在抗旱机制上的差异，为深入研究植物抗旱性提供了有价值的理论依据，同时对抗旱作物品种的培育与改良具有重要的指导意义。

渗透调节是植物应对干旱胁迫的关键生理机制之一^[34]。本研究发现，LL1 的 SP 含量随干旱程度加剧而逐渐降低，这与张平等^[35]的研究结论一致。其主要原因在于干旱抑制了大部分蛋白质的合成，SP 的减少削弱了细胞的渗透调节能力，并限制了受损生物大分子的修复，进而影响植物的整体适应性^[36]。LQ18 在轻度干旱胁迫下，通过增加 SP 含量增强叶片渗透调节能力，维持正常生理活动；但随着干旱程度加剧，SP 介导的保护机制逐渐达到其调节阈值。Pro 作为植物蛋白质的组成成分，在重度干旱胁迫下，植物可通过提高体内 Pro 含量增强耐旱性^[37]。与 LL1 相比，LQ18 在重度干旱胁迫下积累了更多 Pro，展现出更强的抗旱特性，表明在干旱胁迫下，抗旱性更强的品种通常具有更高含量且显著增加的渗透调节物质，从而更有效地保护细胞代谢活动并适应环境胁迫。

4 结论

在干旱胁迫下，LQ18 的各项发芽指标与对照均无显著差异，而 LL1 则随胁迫程度加剧而逐渐降低。在重度干旱胁迫下，LQ18 的叶面积和地上部干重降幅，以及根长、地下部干重和根冠比增

幅均小于 LL1。LQ18 通过增加 SP 和 Pro 含量来优化渗透调节, 有效减轻干旱引发的氧化损伤; 而 LL1 仅依赖 Pro 调节渗透平衡, 难以应对更严重的干旱胁迫。重度干旱胁迫下, LQ18 的 SOD 和 POD 协同调节作用优于 LL1。LQ18 在干旱胁迫下展现出更优的生理适应策略, 证实其具有较强的抗旱能力与细胞保护机制。

参考文献

- [1] 田计均, 唐媛, 董雨, 等. 水分胁迫对不同发育时期藜麦生理的影响. 生物学杂志, 2020, 37(6): 73-76.
- [2] 郭浩彬, 李敏杰, 张陆燕, 等. 美拉德反应优化藜麦多肽抗氧化活性的研究. 中国调味品, 2023, 48(12): 59-68.
- [3] Alvar-Beltrán J, Verdi L, Marta A D, et al. The effect of heat stress on quinoa (cv. Titicaca) under controlled climatic conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 2020, 158(4): 255-261.
- [4] 王洋. 藜麦抗旱种质资源鉴定及抗旱生理和分子机制研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [5] 刘文瑜, 何斌, 杨发荣, 等. 不同品种藜麦幼苗对干旱胁迫和复水的生理响应. 草业科学, 2019, 36(10): 2656-2666.
- [6] 吴龙龙, 田仓, 张露, 等. 稻田水氮氧环境因子对水稻生长发育、光合作用和氮利用的调控研究进展. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1498-1508.
- [7] 姚庆, 秦培友, 苗昊翠, 等. PEG 模拟干旱胁迫下藜麦萌发期抗旱性评价. 新疆农业科学, 2019, 56(9): 1588-1596.
- [8] 王启学, 王兴, 余轩, 等. 荒漠区湿地植物群落分类排序及其与土壤环境因子的关系. 草业科学, 2023, 40(1): 37-45.
- [9] Sun Y, Liu F L, Bendevís 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.
- [10] García-Caparrós P, De Filippis L, Gul A, et al. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. *The Botanical Review*, 2020, 87(4): 1-46.
- [11] Hinojosa L, Sanad M N M E, Jarvis D E, et al. Impact of heat and drought stress on peroxisome proliferation in quinoa. *The Plant Journal*, 2019, 99(6): 1144-1158.
- [12] Zhu X L, Liu W Y Q, Wang B, et al. Molecular and physiological responses of two quinoa genotypes to drought stress. *Frontiers in Genetics*, 2024, 15, 1439046.
- [13] 陈雅琦, 苏楷淇, 陈泰祥, 等. 混合盐碱胁迫对醉马草种子萌发及幼苗生理特性的影响. 草业学报, 2021, 30(3): 137-157.
- [14] 朱丽丽, 张业猛, 张发玉, 等. 不同类型藜麦萌发期抗旱性差异分析及萌发进程模型拟合. 种子, 2023, 42(5): 9-17.
- [15] Okami M, Kato Y, Kobayashi N, et al. Morphological traits associated with vegetative growth of rice (*Oryza sativa* L.) during the recovery phase after early-season drought. *European Journal of Agronomy*, 2015, 64: 58-66.
- [16] Hammerschmidt R, Nuckles E M, Kuć J A. Association of enhanced peroxidase activity with induced systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum lagenarium*. *Physiological Plant Pathology*, 1982, 20: 73-76.
- [17] Du Z, Bramlage W J. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 40(9): 1566-1570.
- [18] Beyer W F, Fridovich I. Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions. *Analytical Biochemistry*, 1987, 161(2): 559-566.
- [19] Bates L S, Waldren R P, Teare I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 1973, 39: 205-207.
- [20] 王占军, 季波, 纪童, 等. 5 种豆科牧草抗旱性研究与评价. 草业学报, 2023, 32(10): 187-199.
- [21] 李佩婷, 赵振丽, 黄潮华, 等. 基于转录组及 WGCNA 的甘蔗干旱响应调控网络分析. 作物学报, 2022, 48(7): 1583-1611.
- [22] 王晓雨, 王小平, 史文字, 等. 拔节期冬小麦光合特性、干物质积累和产量对干旱胁迫的响应. 新疆农业科学, 2023, 60(9): 2163-2172.
- [23] 张俊杰, 陈金平, 汤钰鏊, 等. 花期前后干旱胁迫对复水后夏玉米光合特性与产量的影响. 作物学报, 2023, 49(5): 1397-1409.
- [24] 单皓, 罗海婧, 张松, 等. 不同抗旱性小豆根系对干旱-复水的生理生态响应. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 94-100, 127.
- [25] 刘文瑜, 杨发荣, 谢志军, 等. 不同品种藜麦幼苗对干旱胁迫的生理响应及耐旱性评价. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 10-18.
- [26] 邓杨, 王瑶, 郭洋楠, 等. 干旱胁迫下柳枝稷在露天矿区土壤中的种子萌发和生长特性. 生态学报, 2022, 42(22): 9175-9185.
- [27] 袁野梅, 柳隽瑶, 高秀丽, 等. 温带草原 7 种针茅植物根系特征及其对环境因子变化的适应. 生态学报, 2022, 42(21): 8784-8794.
- [28] 魏志敏, 赵宇, 崔纪茵, 等. 干旱胁迫对不同品系藜麦苗期生长特性的影响. 农业技术与装备, 2024(5): 177-179.
- [29] 沈文远, 陈昕钰, 余徐润, 等. 根际温度胁迫对小麦根系形态及生理影响的研究进展. 作物杂志, 2022(6): 23-32.
- [30] Qi Y, Ma L L, Ghani M I, et al. Effects of drought stress induced by hypertonic polyethylene glycol (PEG-6000) on *Passiflora edulis* Sims. physiological properties. *Plants*, 2023, 12(12): 1-14.
- [31] Chen R, Hu X T, Chen D Y, et al. Heat and drought priming induce tolerance to subsequent heat and drought stress by regulating leaf photosynthesis, root morphology, and antioxidant defense in maize seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 202: 1-16.
- [32] 刘牧野, 郭丽珠, 岳跃森, 等. 干旱胁迫下不同性别野牛草生理及抗氧化酶基因表达差异. 草业学报, 2023, 32(10): 93-103.
- [33] 李伟成, 盛海燕, 高贵宾, 等. 高温干旱对髯毛箬竹的叶和细根的生理生态影响. 环境科学研究, 2017, 30(12): 1908-1918.
- [34] Ozturk M, Turkyilmaz Unal B, García-Caparrós P, et al. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 2020, 172(2): 1321-1335.
- [35] 张平, 张慧, 刘俊娜, 等. 干旱及复水处理对抗旱性不同小麦品种/系苗期生理生化指标的影响. 西北农业学报, 2020, 29(12): 1795-1802.
- [36] Gujjar R S, Roytrakul S, Chuekong W, et al. A synthetic cytokinin influences the accumulation of leaf soluble sugars and sugar transporters, and enhances the drought adaptability in rice. *3 Biotech*, 2021, 11(8): 369-369.
- [37] 秦岭, 陈二影, 张艳亭, 等. 干旱及复水对谷子脯氨酸积累和 *SlP5CR* 基因表达的影响. 分子植物育种, 2018, 16(22): 7460-7465.

Physiological Response of Quinoa Seedlings with Drought Resistance to Drought Stress

Gao Yanmei¹, Feng Pengrui¹, Chen Weiwei¹, Zhang Meng¹, Zhang Yongqing^{1,2}

(¹College of Life Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China;

²College of Geography Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract To investigate the response of drought-resistant quinoa seedlings to drought stress, the strongly drought-resistant quinoa variety Longli No.1 (LL1) and the new breeding line LQ18 were selected as experimental materials. PEG-6000 solution was used to simulate drought environment. Three treatments were set: normal irrigation (CK), mild drought stress (5% PEG-6000), and severe drought stress (20% PEG-6000). We investigated quinoa seed germination rate, germination potential, germination index; seedling plant height, leaf area, root length, aboveground and underground dry weights; soluble protein and proline contents; superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities; and malondialdehyde (MDA) content. The results showed that severe drought stress reduced plant height, leaf area, and aboveground dry weight in both varieties (lines), but increased root length, underground dry weight, and root-shoot ratio. Specifically, the reductions in leaf area and aboveground dry weight, as well as the increases in root length, underground dry weight, and root-shoot ratio were all smaller in LQ18 than in LL1. Under drought stress, the soluble protein content of LL1 gradually decreased, while that of LQ18 first increased and then decreased to a level with no significant difference from CK. Under severe drought stress, the proline content of both varieties (lines) significantly increased, and the proline content of LQ18 was significantly higher than that of LL1. Drought stress influenced the activities of SOD and POD and increased MDA content in both varieties (lines). Under severe stress, the SOD activity of LQ18 decreased slightly, whereas its POD activity increased significantly; furthermore, its MDA content remained significantly lower than that of LL1.

Key words Quinoa; Drought stress; Seed germination; Seedling growth; Physiological characteristics