



广西植物

Guihaia

ISSN 1000-3142, CN 45-1134/Q

《广西植物》网络首发论文

题目: NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长及生理特性的影响
作者: 权有娟, 袁飞敏, 李想, 刘德梅, 陈志国
网络首发日期: 2019-12-11
引用格式: 权有娟, 袁飞敏, 李想, 刘德梅, 陈志国. NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长及生理特性的影响. 广西植物.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20191209.1518.012.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长及生理特性的影响

权有娟^{1,2}, 袁飞敏³, 李想^{1,2}, 刘德梅¹, 陈志国¹✉

(1.中国科学院西北高原生物研究所/中国科学院高原生物适应与进化重点实验室/青海省作物分子育种重点实验室 西宁 810008; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

✉通信作者 陈志国, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物遗传育种研究, (E-mail)zgchen@nwipb.cas.cn

摘要 为探讨盐胁迫下两类不同地区藜麦品种幼苗的耐盐机制, 该文利用不同浓度的 NaCl 溶液, 对来自青海省海东市乐都区的“LD-13”(低盐地区)和来自青海省海西州乌兰县的“WL-192”(高盐地区)的 2 个藜麦品种种子和幼苗进行盐胁迫处理, 研究种子萌发指标(发芽率、发芽势、发芽指数)、生长指标(鲜重、根长、茎长)及生理指标(MDA 含量及 SOD、POD、CAT 活性)等的变化。结果表明:低盐浓度(NaCl 浓度小于 250 mmol·L⁻¹)胁迫下, 2 个藜麦品种种子的萌发、幼苗生长及生理活性表现均较适宜;但中、高盐浓度(NaCl 浓度大于 250 mmol·L⁻¹)胁迫下, 其种子萌发、生长及幼苗生理活性均受到不同程度的抑制。从耐盐性综合评价 D 值看, 虽然同为山谷型的藜麦品种, 适应盐碱地栽培的 WL-192 品种比低盐土壤中生长的 LD-13 品种更耐盐。推测 WL-192 比 LD-13 耐盐性除了受选育地区土壤盐度的影响外, 还可能与品种自身及光周期、温度、海拔、纬度等外部生长环境等因素有关。结合青海西部地区气候环境和盐碱土地资源开发利用, WL-192 品种更适合在青海地区推广种植。

关键词 藜麦; NaCl 胁迫; 幼苗生长; 生理特性; 耐盐性

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201907033

Response of seedling growth and physiological characteristics of *Chenopodium quinoa* Willd. under NaCl stress

QUAN Youjuan^{1,2}, YUAN Feimin³, LI Xiang^{1,2}, LIU Demei¹, CHEN Zhiguo¹✉

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science/Key Laboratory of Adaptation and Evolution, Chinese Academy of Science/Key Laboratory of Crop Molecular Breeding in Qinghai Province, 810008, Xining, China; 2. University of Chinese Academy of Science, 100049, Beijing, China; 3. North West Agriculture and Forestry University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract In order to explore the mechanism of salt tolerance in seedlings of quinoa varieties in two different regions, the seeds of two quinoa varieties “LD-13” (low salt area) from Ledu District, Haidong City, Qinghai Province and “WL-192” (high salt area) from Wulan County, Haixi Prefecture, Qinghai Province were treated with different concentrations of NaCl solution, studying the changes of seed germination indexes (germination rate, germination energy, germination index), growth indexes (fresh weight, root length, stem length) and physiological indexes (MDA content, SOD, POD, CAT activity). The results showed that under the stress of low salt concentration (NaCl concentration less than 250 mmol L⁻¹), the seed germination, seedling growth and physiological activity of the two quinoa varieties were suitable. However, under the high salt concentrations (NaCl concentration > 250 mmol L⁻¹) stress, the seed germination, growth and seedling physiological activity were inhibited to varying degrees. According to the comprehensive evaluation value of salt tolerance, although the same valley type of quinoa varieties, WL-192 varieties adapted to saline-alkali soil were more salt-tolerant than LD-13 varieties which grown in low-salt soil. It is speculated that the salt tolerance of WL-192 than LD-13 may be affected not only by soil salinity, but also by variety itself, photoperiod, temperature, altitude, latitude and other external growth environment factors. Combined with the climatic environment and the development and utilization of saline-alkali land resources in the western region of Qinghai, WL-192 varieties are more suitable for popularization and cultivation in Qinghai.

基金项目: 中国科学院种子创新研究院项目 (INASEED); 海西州财政支持农业项目 (HXNM001); 青海省种子工程项目 (2019016); 青海省重点研发与转化计划项目 (2019-NS-045)

作者简介: 权有娟(1994-), 女, 青海西宁市人, 在读硕士, 主要从事植物遗传育种研究, (E-mail)quanyoujuan828@163.com

Fund: Supported by The Innovative Academy of Seed Design (INASEED); Financial Support Agriculture Project of Haixi Prefecture (HXNM001); Qinghai Seed Engineering Project (2019016); Key R & D and Transformation Program projects of Qinghai Province (2019-NS-045)

网络首发时间: 2019-12-11 07:22:44 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20191209.1518.012.html>

Key words *Chenopodium quinoa* Willd.; NaCl stress; seedling growth; physiological characteristics; salt tolerance

全球气候变化通过影响农作物的生长环境条件成为世界粮食供给的限制性因素，尤其是干旱导致土壤盐分增加，对粮食生产构成主要威胁，预计到 2050 年盐碱地将占有可耕地面积的 50% 以上 (Flowers et al., 2010 & Banerjee et al., 2017)。盐胁迫几乎能影响世界上所有植物的产量 (Flowers et al., 2015)，因此，非常有必要寻找一种潜在的盐生代替作物，在土壤盐渍化程度加快的情况下仍能适应农业生产 (Koyro et al., 2003)，即所谓的“盐生经济作物”，它既能可持续利用，减少气候条件变化对作物产量及粮食需求的影响，扩大世界上干旱、半干旱土地利用的面积，又可改善土地盐渍化和荒漠化问题等 (Eisa et al., 2012 & Geissler et al., 2009)。

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.) 是苋科藜亚科藜属植物中典型的“假禾谷类”作物，主要用于收获籽粒，适应范围广，从海平面到海拔 4000 米以上的高山峡谷地区都可以生长，籽粒中具有较高的营养物质 (Abogoch et al., 2009 & Alvarez-Jubete et al., 2009)，是目前风靡全世界的“黄金谷物”。由于特殊的生境选择，使藜麦具有较强的耐非生物胁迫能力，尤其是耐盐和抗旱特性 (Adolf et al., 2013)，被大多数学者认为是所有盐生植物中最具潜力的一种盐生替代作物，也被当做研究植物耐盐机制的模式作物 (Ruiz et al., 2015)。

青海境内有近 $270.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 盐碱地，盐碱化土地面积排在全国前列，主要以氯化物-硫酸盐为主 (庞宁菊等, 2001 和王予声等, 1997)，本文通过研究 NaCl 胁迫对不同地区选择的藜麦品种的种子萌发、幼苗生长和生理指标特性等的影响，探讨藜麦苗期的耐盐机制，为青海地区藜麦品种的选育和推广提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试藜麦品种为乐都-13 号 (简称 LD-13) 和乌兰-192 号 (简称 WL-192)，LD-13 品种由本课题组选育，选育地点在青海省海东市乐都区中国科学院西北高原生物研究所海东生态农业试验站，该站位于湟水河流域，海拔 1967 m，属于青海省东北部农业主产区，年平均气温 $6 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上，年降水量 350 mm，年日照时数 2600-2800 h，土壤中的盐分含量低。WL-192 品种由乌兰三江沃土生态农业科技有限公司引种培育，选育地点在青海省海西州乌兰县希里沟镇，位于柴达木盆地东部，为农牧交错区，海拔 2950 m，年平均气温 $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，年平均降水量只有 178.6 mm，全年日照百分率为 65%-70%，是青海太阳辐射富集地区之一，土壤含盐量较高。

供试种子分别于 2018 年 8 月和 10 月完成采集，采集后将种子自然晾干，调查农艺性状并分装到纸袋中备用。品种详细信息见表 1。

表1 供试藜麦品种的农艺性状
Table 1 Agronomic characters of test quinoa varieties

| 品种名 Variety name | LD-13 | WL-192 |
|------------------------------|-------------------|----------------|
| 生态类型 Ecological type | 山谷型 Vally type | 山谷型 Vally type |
| 种皮颜色 Testa color | 姜黄色 Ginger yellow | 玫红色 Rose red |
| 粒径 (长×宽) Grain diameter (mm) | 1.4×1.5 | 1.7×1.8 |
| 千粒重 Thousand seed weight (g) | 3.01 | 3.47 |

1.2 试验设计

将采集的藜麦种子过直径 1.5 mm 筛，挑选成熟度好、饱满、大小一致的种子，用 70% 的酒精消毒后用蒸馏水清洗 3 次，用无菌滤纸吸干水分备用。配制 200、250、300、350 和 400 mmol L^{-1} 的 5

个梯度 NaCl 溶液，用蒸馏水做对照（CK），每个梯度溶液分别取 12 mL，倒入铺有两层滤纸的发芽盒（12 cm×12 cm×6 cm）中，发芽盒中摆放 30 粒种子并置于人工智能种子培养箱中，参数设置为白天（16 h）25 ℃，夜晚（8 h）20 ℃，湿度控制在 50-60%之间，夜间无光照，每天定时在发芽盒中加入蒸馏水，以保持 NaCl 浓度相同，每处理 3 次重复。每天统计种子发芽数，以胚根长大于 2 mm 为准，连续统计 7 天，计算种子发芽率、发芽势、发芽指数，第 8 天测量根长、茎长、鲜重，待幼苗长出真叶时，测幼苗生理指标。

1.3 指标及测定方法

1.3.1 种子萌发指标的测定

(1) 发芽率 (Gr) % = $n/N \times 100\%$ (n 为第 7 天萌发种子数, N 为供试种子数) (孙时轩, 1991) ;

(2) 发芽势 (GV) % = 第 3 天的种子萌发数/供试种子数×100% (袁飞敏等, 2018) ;

(3) 发芽指数 (GI) % = $\sum (G_t/D_t)$ (G_t 为第 t 天的萌发数, D_t 为总的萌发天数)

1.3.2 生长指标的测定

每个处理的每个重复随机选取 10 株藜麦幼苗，用 20 cm 直尺、游标卡尺、千分之一的电子天平测量胚根长、茎长（与发芽盒底部垂直的部分）及鲜重，取平均值。

1.3.3 幼苗生理指标的测定

采用南京建成生物公司生产的试剂盒在酶标仪上分别测量丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化氢酶 (CAT) 活性和过氧化物酶 (POD) 活性 4 个生理指标，每个指标重复测 3 次。

1.4 数据分析

用 Excel 2016、SPSS 22.0 软件对试验数据进行统计与处理，显著性 $P < 0.005$ 。耐盐性综合评价 D 值的计算参考自杨佳鑫 (2019)。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对种子萌发特性的影响

实验表明，LD-13 种子萌发的各项指标随 NaCl 浓度的升高而呈先升高后降低的趋势（表 2）。与 CK 相比，NaCl 胁迫浓度在 200 ~ 250 mmol L⁻¹ 时对发芽率、发芽势及发芽指数都具有显著促进作用；而当 NaCl 胁迫浓度大于 250 mmol L⁻¹ 时对各萌发指标均具有显著的抑制作用。

WL-192 种子的发芽率随 NaCl 浓度的升高也呈先上升后下降趋势，但发芽势和发芽指数随 NaCl 浓度的升高呈下降趋势。当 NaCl 胁迫浓度在 200 ~ 300 mmol L⁻¹ 时，对发芽率的促进作用明显，均达到 100%，显著高于 CK；当 NaCl 胁迫浓度大于 300 mmol L⁻¹ 后发芽率被明显抑制，显著低于 CK。发芽势和发芽指数在 200 ~ 250 mmol L⁻¹ NaCl 胁迫浓度之间下降趋势不明显，和 CK 相比差异不显著。而当 NaCl 胁迫浓度大于 250 mmol L⁻¹ 时，发芽势和发芽指数的下降趋势明显，和 CK 相比差异显著。

表2 NaCl胁迫对藜麦品种种子萌发指标的影响 ($\bar{X} \pm SD$)
Table 2 Effects of NaCl stress on quinoa varieties seed germination indexes ($\bar{X} \pm SD$)

| NaCl 浓度 NaCl concentration mmol·L ⁻¹ | 材料 Material | | | | | |
|---|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-------------|
| | LD-13 | | | WL-192 | | |
| | 发芽率 GR (%) | 发芽势 GV (%) | 发芽指数 GI | 发芽率 GR (%) | 发芽势 GV (%) | 发芽指数 GI |
| 0 (CK) | 90.00±0.58b | 81.10±0.98a | 44.30±1.29a | 94.43±0.33b | 86.67±0a | 52.03±1.46a |
| 200 | 100.00±0a | 73.33±0.58b | 34.75±0.42b | 100.00±0a | 84.43±0.88a | 49.18±0.97a |
| 250 | 100.00±0a | 77.77±0.33b | 37.34±0.39bc | 100.00±0a | 80.00±0.58a | 44.22±0.52a |
| 300 | 90.00±0.58b | 33.33±1.53c | 19.07±0.31d | 100.00±0a | 56.67±0.57b | 30.40±0.37b |
| 350 | 83.30±0.33c | 18.90±0.88d | 15.21±0.50e | 86.77±0.58c | 32.23±1.76c | 19.05±0.25c |
| 400 | 67.76±0.33d | 4.43±0.88e | 11.35±0.27f | 74.43±0.33d | 17.76±0.33d | 14.72±0.41d |

注: GR.发芽率; GV.发芽势; GI.发芽指数。不同小写字母代表各个 NaCl 浓度处理在 0.05 水平下的显著性。下同。

Note: GR.germination rate; GV.germination potential; GI.germination index. Different lowercase letters represent the significance of each NaCl concentration treatment at 0.05 level. The same below.

2.2 NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长特性的影响

由表 3 可知, LD-13 品种的幼苗鲜重、根长、茎长随着 NaCl 浓度的升高呈先上升后下降的趋势。与 CK 相比, 200 ~ 250 mmol L⁻¹NaCl 胁迫可显著促进幼苗鲜重、胚根及幼茎增长; 在 NaCl 胁迫浓度大于 250 mmol L⁻¹ 时, 3 个生长指标均被抑制, 显著低于 CK。当 NaCl 浓度大于等于 350 mmol L⁻¹ 时对茎的生长抑制作用最明显, 幼苗基本没有长出茎。

WL-192 品种的幼苗鲜重、根长、茎长随着 NaCl 处理浓度的升高呈显著下降趋势并低于 CK。3 个生长指标在 200 ~ 250 mmol L⁻¹NaCl 胁迫浓度之间下降趋势不明显, 和 CK 相比差异不显著; 而当 NaCl 胁迫浓度大于 250 mmol L⁻¹ 时, 各指标下降趋势明显, 和 CK 相比差异显著。400 mmol L⁻¹NaCl 胁迫下, 根长仅为 CK 的 18.5%, 对茎的抑制作用显著, 没有分化出茎。

表3 NaCl胁迫对藜麦品种幼苗生长指标的影响 ($\bar{X} \pm SD$)
Table 3 Effects of NaCl stress on quinoa varieties seedling growth indexes ($\bar{X} \pm SD$)

| NaCl 浓度 NaCl concentration (mmol·L ⁻¹) | 材料 Material | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | LD-13 | | | WL-192 | | |
| | 鲜重 FW (mg) | 根长 RL (cm) | 茎长 SL (cm) | 鲜重 FW (mg) | 根长 RL (cm) | 茎长 SL (cm) |
| 0 (CK) | 12.54±1.23a | 1.86±0.86b | 2.07±0.19a | 14.10±0.15a | 4.17±0.96a | 3.28±0.48a |
| 200 | 9.25±1.00b | 2.32±0.24a | 0.37±0.05b | 13.50±0.09a | 3.73±0.45a | 2.41±0.23a |
| 250 | 10.35±0.36b | 2.35±0.15a | 0.41±0.08b | 12.65±0.27a | 3.46±0.21a | 2.35±0.16a |
| 300 | 8.02±0.019c | 1.74±0.08c | 0.17±0.04c | 10.10±0.13b | 1.46±0.10b | 0.76±0.11b |
| 350 | 7.12±0.24c | 0.79±0.08d | 0.00±0.00cd | 8.90±0.10c | 1.04±0.07b | 0.4±0.09bc |
| 400 | 6.17±0.52c | 0.35±0.10de | 0.00±0.00cd | 7.60±0.20cd | 0.77±0.08b | 0.00±0.00bcd |

注: FW.鲜重; RL.根长; SL.茎长。

Note: FW.fresh weight; RL.root length; SL.stem length.

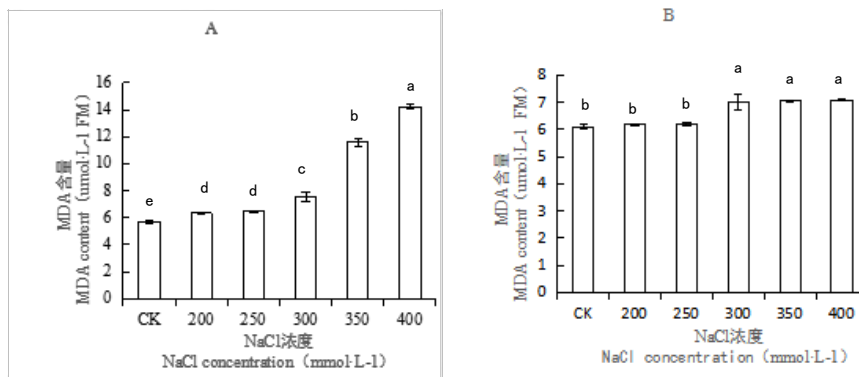
2.3 NaCl 胁迫对幼苗生理特性的影响

2.3.1 NaCl 胁迫下丙二醛 (MDA) 含量的变化

MDA 的量可反映植物组织内脂质过氧化程度, 间接反映细胞膜损伤程度, 含量越高说明细胞膜受损严重, 抗逆境胁迫能力越弱 (刘文瑜等, 2017)。

2 个品种幼苗中 MDA 的含量随 NaCl 浓度的升高呈上升趋势, 且均高于 CK (图 1: A, B)。LD-13 品种在所有浓度 NaCl 胁迫处理下的 MDA 含量均显著上升, 分别比 CK 高 10.3%、12.5%、24.7%、50.9% 和 60.0%, 差异显著 (图 1A)。WL-192 品种在 200 ~ 250 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下 MDA 的含量分别比 CK 升高了 1.3%、2.4%, 差异不显著; NaCl 浓度大于 250 mmol L⁻¹ 时, MDA 的含量分别比 CK 升高了 18.9%、19.4% 和 19.9%, 差异显著 (图 1B)。

在非 NaCl 胁迫下, WL-192 幼苗中 MAD 的含量比 LD-13 高, 当受到不同浓度 NaCl 胁迫时, LD-13 幼苗中 MDA 的含量都高于 WL-192, 并且上升幅度比 WL-192 大, 说明随着盐浓度的升高, LD-13 在盐胁迫下比 WL-192 的细胞膜受损更严重, LD-13 较 WL-192 对盐胁迫敏感。



注：不同小写字母代表各个 NaCl 浓度处理在 0.05 水平下的显著性。下同。

Note: different lowercase letters represent the significance of each NaCl concentration treatment at 0.05 level. The same below.

图 1 LD-13 和 WL-192 藜麦品种幼苗中 MDA 的含量分别为图中 A 和 B
Fig. 1 The contents of MDA in the seedlings of LD-13 and WL-192 are A and B, respectively.

2.3.2 NaCl 胁迫下超氧化物歧化酶 (SOD) 的变化

植物体内 SOD 酶在氧化与抗氧化平衡中起着关键作用，它能清除超氧阴离子自由基 (O₂^{·-}) 以保护细胞不受损伤。

2 个藜麦品种幼苗中 SOD 酶活性随 NaCl 浓度的升高而呈先升高后降低的趋势 (图 2: A, B)。LD-13 品种在 200 ~250 mmol L⁻¹ NaCl 胁迫下，SOD 酶活性显著上升，分别比 CK 高 6.4%和 12.6%；在 300 ~ 400 mmol L⁻¹NaCl 浓度之间，SOD 酶活性降低，分别比 CK 低 0.5%、12.5%和 17.5%，其中，350 和 400 mmol L⁻¹NaCl 胁迫下差异显著 (图 2A)。WL-192 在 200 ~ 300 mmol L⁻¹ 盐胁迫下，SOD 酶活性比 CK 分别高 18.8%、25.3%和 25.5%，其中 200 和 250 mmol L⁻¹NaCl 胁迫下差异显著；350 和 400 mmol L⁻¹NaCl 胁迫下 SOD 酶活性下降，仍然比 CK 高 22.0%和 10.57%，差异显著 (图 2B)。

无论是 CK 或 NaCl 胁迫处理，WL-192 藜麦幼苗中的 SOD 酶活性始终比 LD-13 高，LD-13 中 SOD 酶活性在 250 mmol L⁻¹ NaCl 浓度处理时开始下降，而 WL-192 在大于 300 mmol L⁻¹ 盐浓度时才开始下降。由此可见，WL-192 幼苗中 SOD 酶活性比 LD-13 高，细胞较不易受损伤。

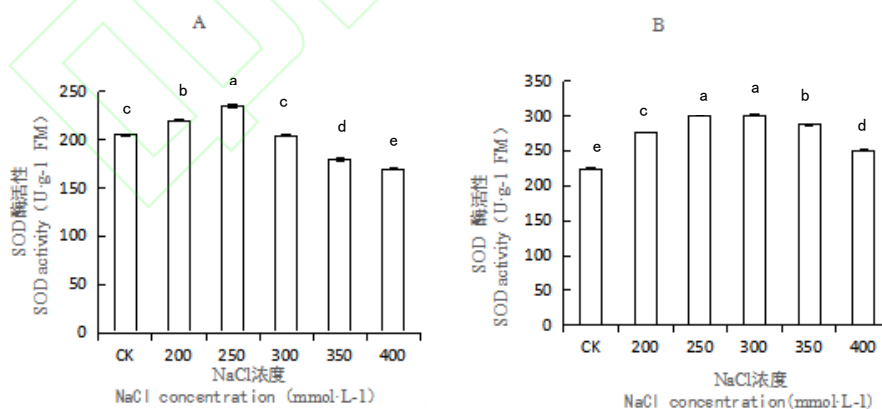


图 2 LD-13 和 WL-192 藜麦品种幼苗中 SOD 酶活性分别为图中 A 和 B
Fig. 2 The activities of SOD enzyme in the seedlings of LD-13 and WL-192 are A and B, respectively.

2.3.3 NaCl 胁迫下过氧化物酶 (POD) 的变化

POD 酶是植物体内重要的一种抗氧化酶，它可通过清除逆境胁迫下细胞产生的活性氧，保持细胞膜结构完整，增强植物的抗逆性。

2 个藜麦品系幼苗中 POD 酶活性随盐浓度的升高而呈先升高后降低的趋势 (图 3: A, B)。LD-

LD-13 在 200 ~ 250 mmol L⁻¹ 盐胁迫下, POD 酶活性比 CK 分别升高 24.0%、24.2%, 差异显著; 300 ~ 400 mmol L⁻¹ 浓度下, POD 酶活性比 CK 分别降低 5.9%、21.6% 和 43.6%, 差异显著 (图 3A)。WL-192 在 200 ~ 300 mmol L⁻¹ NaCl 胁迫下, 与 CK 相比, POD 酶活性分别显著升高了 2.7%、6.0%、6.8%; 350 ~ 400 mmol L⁻¹ 盐胁迫下, POD 酶活性显著下降, 分别比 CK 低 15.5% 和 17.3% (图 3B)。

2 个藜麦品种相比, 无论胁迫与否, LD-13 幼苗中 POD 酶活性始终高于 WL-192, 说明低盐土壤中生长的 LD-13 品种幼苗中的 POD 酶清除有害物质的能力强, 保护细胞膜不受伤害, 而生长在高盐土壤中的 WL-192 随盐浓度的升高, 植物体内的活性氧被积累, 导致细胞膜受损。

2.3.4 NaCl 胁迫下过氧化氢酶 (CAT) 的变化

CAT 酶通过清除植物体内的过氧化氢而使细胞免受伤害。

LD-13 幼苗中 CAT 酶活性随盐浓度的升高而呈先上升后降低趋势 (图 4A)。在 200 ~ 300 mmol L⁻¹ NaCl 胁迫下, CAT 酶活性比 CK 分别上升了 20.8%、20.1% 和 18.4%, 差异显著; 350 ~ 400 mmol L⁻¹ 盐胁迫下, CAT 活性显著降低, 分别比 CK 低 29.0% 和 53.1%。WL-192 幼苗中 CAT 酶活性随盐浓度的升高而呈上升趋势 (图 4B)。与 CK 相比, CAT 酶活性分别上升了 60.3%、55.9%、38.8%、17.5%、11.5%, 差异显著。

在无盐胁迫时, LD-13 中的 CAT 活性比 WL-192 高很多, 但是受到盐胁迫时, WL-192 藜麦幼苗中的 CAT 活性比 LD-13 高, 说明 WL-192 幼苗在盐胁迫下清除体内过氧化氢的能力比 LD-13 强。

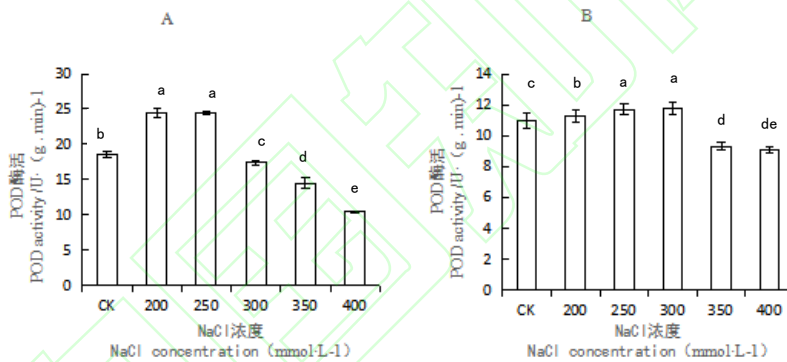


图 3 LD-13 和 WL-192 藜麦品种幼苗中 POD 酶活性分别为图中 A 和 B
Fig. 3 The activities of POD enzyme in the seedlings of LD-13 and WL-192 are A and B, respectively.

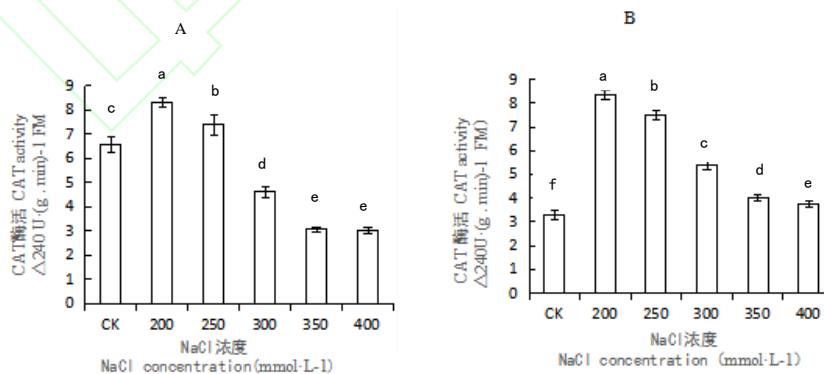


图 4 LD-13 和 WL-192 品种幼苗中 CAT 酶活性分别为图中 G 和 H
Fig. 4 the activities of CAT enzyme in the seedlings of LD-13 and WL-192 are G and H, respectively.

2.4 不同地区藜麦品种耐盐性综合评价

2 个来自不同地区的藜麦品种对 NaCl 胁迫耐受性存在较大差异 (表 4), 分别表现在种子萌发、生长及幼苗生理活性等方面。LD-13 中除了发芽率、发芽指数、POD 及 CAT 酶活性外, 其他指标的

隶属值均低于 WL-192。根长的权重最大，为 0.201，CAT 的权重最小，为 0.043。从综合评价 D 值看出，WL-192 的耐盐性高于 LD-13。

表4 2个藜麦品种的耐盐性综合评价
Table 4 Comprehensive evaluation of salt tolerance of two Chenopodium varieties

| 品种名 Variety name | 发芽率 GR | 发芽势 GV | 发芽指数 GI | 隶属函数值 | | Subordinative function value | | | | | D 值 D value | 排序 Rank |
|---------------------|-----------|-----------|------------|----------|----------|------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|----------------|------------|
| | | | | 鲜重 FW | 根长 RL | 茎长 SL | MDA 含量 MDA content | SOD | POD | CAT | | |
| LD-13 | 0.421 | 0.427 | 0.454 | 0.538 | 0.660 | 0.342 | 0.201 | 0.0407 | 0.0521 | 0.0347 | 0.45 | 2 |
| WL-192 | 0.421 | 0.434 | 0.453 | 0.845 | 0.715 | 0.551 | 0.199 | 0.0713 | 0.0498 | 0.0304 | 0.52 | 1 |
| 权重 Weight | 0.180 | 0.195 | 0.073 | 0.146 | 0.201 | 0.052 | 0.106 | 0.061 | 0.092 | 0.043 | | |

3 讨论

3.1 NaCl 胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生长、生理活性的影响

芽苗期是藜麦对盐胁迫最敏感的时期 (Jacobsen et al., 1999)，低浓度盐胁迫可增加种子的吸胀能力而促进萌发，充足的水分有利于合成萌发所需的各种酶和结构蛋白，从而完成细胞分裂、分化和胚的生长；相反，高浓度胁迫会造成种子吸水困难，种萌发和幼苗生长被抑制 (韩润燕等, 2014)。本研究结果表明：LD-13 品种在低浓度 NaCl 胁迫下可促进种子萌发、幼苗生长以及增强抗氧化酶活性，高浓度 NaCl 胁迫则产生了明显的抑制作用；WL-192 品种中，低浓度和高浓度 NaCl 胁迫对种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性均有抑制作用，低盐胁迫下抑制较轻，高盐胁迫下抑制较重。

植物在逆境下其离子平衡、渗透平衡被打破，SOD、POD、CAT 三种抗氧化酶起保护细胞膜系统作用，在盐胁迫环境下，较高的抗氧化酶活性才能有效的清除活性氧，从而减缓对细胞膜结构的损伤。本试验中，在低浓度 NaCl 胁迫下，2 个藜麦品种的三种抗氧化酶活性均增强，而高浓度 NaCl 胁迫下则明显抑制了抗氧化酶活性；不同浓度的盐胁迫使 2 个藜麦品种中 SOD、CAT 及 POD 酶活性的变化趋势有所不同，耐盐型藜麦品种 WL-192 比盐敏感型藜麦 LD-13 的酶活性更强。2 个藜麦品种对 NaCl 胁迫表现出不同的萌发和生长应答反应，可能是不同产地品种对盐分敏感程度不同造成的。

3.2 藜麦耐盐性与品种自身的特性和外部生长环境有关

植物耐盐性是一个复杂的特性，与形态、生理、生化及分子机制等多方面相关，而这些机制又都与盐分制约植物生长的渗透作用、气体交换、离子毒性和营养失衡等因素相关联 (Flowers and Colmer et al., 2008)。藜麦作为典型的泌盐植物，其叶脉附近有盐腺或盐囊，特殊的表皮细胞能隔离和外排代谢细胞中多余的盐分，高度耐盐的藜麦品种其盐囊呈淡红色，在盐胁迫下具有较强的竞争优势 (Agarie S et al., 2007)。虽然 LD-13 和 WL-192 两个藜麦品种同属山谷型，但对 NaCl 胁迫分别做出不同的响应，这可能跟品种选育过程中对外部环境如纬度、海拔、温度、气候条件及光周期等的适应有关。

4 结论

综上所述，低浓度 NaCl 刺激对藜麦种子萌发、生长、幼苗生理活性具有促进作用，高浓度 NaCl 胁迫则有抑制作用。在不同盐浓度土壤介质中选育的 2 个藜麦品种在 200 ~ 250 mmol L⁻¹NaCl 浓度胁迫下，其萌发指标、生长指标及生理特性表现均较好。在盐碱土中选择的 WL-192 藜麦各项萌发指标和生长生理指标都比 LD-13 强，耐盐性更好。结合 2 个藜麦品种在青海不同种植地区生产实际中的综合农艺性状表现，认为青海西部地区的盐渍土比东部地区的低盐分土壤更适合藜麦的种植。

参考文献

- [1] ABUGOCH LE, 2009. Quinoa(Chenopodium quinoa Willd.) : composition, chemistry, nutritional and functional properties [J]. Adv Food Nutr Res, 58: 1-31.
- [2] ADOLF VI, SHABALA S, ANDERSEN MN, et al.,2013. Salt tolerance mechanism in quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) [J]. Environ Exp Bot, 92(SI): 43-54.
- [3] AGARIE E, SHIMODA T, SHIMIZU Y, et al.,2007. Salt tolerance, salt accumulation, and ionic homeostasis in an epidermal bladder-cell-less mutant of the common ice plant Mesembryanth- emum crystallinum [J]. J Exp Bot, 58(8): 1957-1967.
- [4] ALVAREZ-JUBETE L, ARENDT EK, GALLAGHER E, 2009. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free

- ingredients [J]. *Int J Food Sci Nutr*, 60(4): 240-257.
- [5] BANERJEE K, GATTI RC, MITRA A, 2017. Climate change-induced salinity variation impacts on a stenoeccious mangrove species in the Indian Sundarbans [J]. *AMBIO*, 46(4): 492-499.
- [6] EISA S, HUSSIN S, GEISSLER N, et al., 2012. Effect of NaCl salinity on water relations, photosynthesis and chemical composition of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as a potential cash crop halophyte [J]. *Crop Sci*, 6(8): 357-368.
- [7] FLOWERS TJ, GALAL HK, BROMHAM L, 2010. Evolution of halophytes: multiple origins of salt tolerance in land plants [J]. *Funct Plant Biol*, 37(7): 604-612.
- [8] FLOWERS TJ, COLMER TD, 2015. Plant salt tolerance: adaptations in halophytes [J]. *Ann Bot*, 115(3): 327-331.
- [9] FLOWERS TJ, COLMER TD, 2008. Salinity tolerance in halophytes [J]. *New Phytol*, 179(4): 945-963.
- [10] GEISSLER N, HUSSIN S, KOYRO HW, 2009. Interactive effects of NaCl salinity and elevated atmospheric CO₂ concentration on growth, photosynthesis, water relations and chemical composition of the potential cash crop halophyte *Aster Tripolium* L. [J]. *Environ Exp Bot*, 65(2-3): 220-231.
- [11] HAN RY, CHEN YY, ZHOU ZH, et al., 2014. Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of sweet clover [J]. *Agric Res Arid Areas*, 32 (5) : 78-83. [韩润燕, 陈彦云, 周志红, 等, 2014. NaCl胁迫对草木樨种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 32 (5) : 78-83.]
- [12] JACOBSEN SE, JOERNSGARD B, CHRISTIANSEN JL, et al., 1999. Effect of harvest time, drying technique, temperature and light on the germination of quinoa (*Chenopodium quinoa*) [J]. *Seed Sci Technol*, 27(3): 937-944.
- [13] KOYRO HW, 2003. Study of potential cash crop halophytes by a quick check system: determination of the threshold of salinity tolerance and the ecophysiological demands [M]. Netherland : Springer: 5-17.
- [14] LIU WY, YANG FR, HUANG J, et al., 2017. Response of seedling growth and the activities of antioxidant enzymes of *Chenopodium quinoa* to salt stress [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 37 (9) : 1797-1804. [刘文瑜, 杨发荣, 黄杰, 等, 2017. NaCl胁迫对藜麦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 37 (9) : 1797-1804.]
- [15] PANG NJ, DU XN, Li YM, et al., 2001. Causes and improvement of soil salinization along the Yellow River in Qinghai Province [J]. *Chin J Soil Sci*, 32 (6) : 52-55. [庞宁菊, 都学宁, 李月梅, 等, 2001. 青海黄河沿岸农田土壤盐渍化成因及改良途径[J]. *土壤通报*, 32 (6) : 52-55.]
- [16] RUIZ KB, BIONDI S, MARTINEZ EA, et al., 2015. Quinoa -a model crop for understanding salt-tolerance mechanisms in halophytes [J]. *Giorn Bot Ital*, 150(2): 357-371.
- [17] SUN SX, 1991. *Afforestation science* [M]. Beijing: China forestry press, 65-142. [孙时轩, 1991. *造林学* [M]. 北京: 中国林业出版社: 65-142.]
- [18] WANG YS, SHI SL, LIU SY, et al., 1997. *Qinghai Soil* [M]. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 21-414. [王子生, 史书乐, 刘守月等, 1997. *青海土壤* [M]. 北京: 中国农业出版社: 21-414.]
- [19] YANG JX, LI QW, GUO ZY, et al., 2019. Comprehensive evaluation on salt tolerance of three *Prunus mume* varieties [J]. *J Northwest A & F Univ (Nat Sci Ed)*, 47 (08) : 65-74. [杨佳鑫, 李庆卫, 郭子燕, 等, 2019. 3个梅花品种幼苗耐盐性综合评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 47 (08) : 65-74.]
- [20] YUAN FM, QUAN YJ, CHEN ZG, 2018. Effects of sodium stress on seed germination of *Chenopodium quinoa* Willd. [J]. *J Arid Land Reso and Envi*, 32 (11) : 182-187. [袁飞敏, 权有娟, 陈志国, 2018. 不同钠盐胁迫对藜麦种子萌发的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 32 (11) : 182-187.]