中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

藜麦种子萌发阶段响应干旱和盐胁迫变化的综合评价

王志恒，徐中伟，周吴艳，杨秀柳，胡韩，李成虎，马维亮，魏玉清

引用本文:
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(中英文), 2020, 28(7): 1033–1042.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200016

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

类黄酮参与调控中亚滨藜幼苗对盐胁迫的耐受性

Flavonoid is associated with salt stress tolerance inAtriplex centralasiatica seedlings

中国生态农业学报. 2017, 25(9): 1345–1350 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170079

转碱蓬SsNHX1基因烟草的耐盐抗旱性研究

Overexpression of Suaeda salsa SsNHX1 gene enhanced salt and drought tolerance of transgenic tobacco

中国生态农业学报. 2017, 25(10): 1518–1526 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170230

红豆和白扁豆种子萌发和生长对盐胁迫的 响应及其生理机制

Response of seed germination and physiological mechanism of Vigna angularis and Dolichos lablab to salt stress

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1218–1225 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190227

播期对藜麦农艺性状及产量的影响

Effects of sowing time on agronomic characteristics and yield of quinoa

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 643–656 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170852

模拟干旱和盐碱胁迫对碱蓬、盐地碱蓬种子萌发的影响

Effects of PEG, NaCl and Na2CO3 stresses on Suaeda glauca and Suaeda salsa seed germination

中国生态农业学报. 2018, 26(7): 1011–1018 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171033

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 7 月 第 28 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2020, 28(7): 1033−1042

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200016

王志恒, 徐中伟, 周吴艳, 杨秀柳, 胡韩, 李成虎, 马维亮, 魏玉清. 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(中英文), 2020, 28(7): 1033−1042

WANG Z H, XU Z W, ZHOU W Y, YANG X L, HU H, LI C H, MA W L, WEI Y Q. Comprehensive evaluation of quinoa seed responses to drought and salt stress during germination[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 1033−1042

藜麦种子萌发阶段响应干旱和盐胁迫变化的综合评价*

王志恒[1], 徐中伟[1], 周吴艳[1], 杨秀柳[1], 胡 韩[1], 李成虎[2], 马维亮[3], 魏玉清[1**]

(1. 国家民族事务委员会生态系统模型及应用重点试验室/北方民族大学生物科学与工程学院 银川 750021; 2. 宁夏回族自治区海原县农业技术推广服务中心 中卫 755299; 3. 宁夏农林科学院 银川 750000)

摘 要: 随着我国藜麦产业不断发展和利用边际性土地种植规模的扩大, 藜麦种子萌发阶段对干旱和盐胁迫的响应研究越来越受到重视。本文采用室内 PEG-6000 模拟干旱胁迫和 NaCl 模拟盐胁迫, 通过测定发芽率、发芽势、长度和鲜重等 8 个指标, 对 5 个藜麦品种(系)(‘南非 2 号’‘陇藜 1 号’‘陇藜 4 号’、HTH-y605、HTH-01)种子萌发期对干旱和盐胁迫的响应进行综合评价研究, 并利用主成分分析方法评价藜麦的抗旱性和耐盐性, 指出抗旱性和耐盐性的主要评价指标。结果表明: 在藜麦萌发阶段抗旱性综合评价中, 主成分分析将 8 个指标归类为 2 个成分因子, 各成分分别以相对长度和相对发芽率载荷量最大, 可作为藜麦萌发期抗旱性主要鉴定指标。抗旱性强弱顺序为: ‘南非 2 号’>HTH-01>‘陇藜 4 号’>‘陇藜 1 号’>HTH-y605。在其耐盐性综合评价中, 通过主成分分析将 8 个指标归类为 3 个成分因子, 相对长度、相对发芽率和相对发芽指数分别为各成分因子上最大的载荷, 可以作为藜麦萌发期耐盐性的主要鉴定指标, 耐盐性强弱顺序为: HTH-01>HTH-y605>‘陇藜 4 号’>‘陇藜 1 号’>‘南非 2 号’。相关性分析结果显示, 不同藜麦品种萌发阶段抗旱性与耐盐性之间无明显相关性。研究发现藜麦不同品种在抗旱性和耐盐性具有遗传多样性, 其机制有待进一步研究。研究结论对藜麦抗逆机理研究和品种选育有一定的参考价值, 为当前中低产田开发利用提供了理论和数据支持。

关键词: 藜麦; 萌发阶段; 干旱胁迫; 盐胁迫; 抗旱性; 抗盐性

中图分类号: S432.2+1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Comprehensive evaluation of quinoa seed responses to drought and salt stress during germination*

WANG Zhiheng[1], XU Zhongwei[1], ZHOU Wuyan[1], YANG Xiuliu[1], HU Han[1], LI Chenghu[2], MA Weiliang[3], WEI Yuqing[1**]

(1. Key Laboratory of Ecosystem Modelling and Application of State Nationalities Affairs Commission / College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. Agricultural Technology Extension Service Centre of Haiyuan County, Ningxia, Zhongwei 755299, China; 3. Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750000, China)

* 北方民族大学高层次人才项目(2019BJLZ02)和国家自然科学基金项目(31960387)资助

** 通信作者: 魏玉清, 主要从事植物逆境生理与生物质能源研究。E-mail: weiyuqing@126.com
王志恒, 研究方向为植物生理生态学。E-mail: wangzhiheng08@qq.com

收稿日期: 2020-01-06 接受日期: 2020-03-18

* This study was supported by the High-Level Talents Program of North Minzu University (2019BJLZ02) and the National Natural Science Foundation of China (31960387).

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

Received Jan. 6, 2020; accepted Mar. 18, 2020

Abstract: With the development of quinoa industry, the responses of quinoa seeds to drought and salt stress at the germination stage have been gaining attention. In this paper, the drought resistance and salt tolerance of five quinoa cultivars (lines) (including 'South Africa No. 2' 'Longli No. 1' 'Longli No. 4', HTH-y605 and HTH-01) during germination were studied using indoor PEG-6000 simulated drought stress and NaCl simulated salt stress treatments. Germination rate and potential, seedlings length and fresh weight were determined. Principal component analysis was used to evaluate the drought resistance and salt resistance of quinoa, and the main evaluation indices for drought resistance and salt tolerance were identified. Results showed that different stresses had little effect on germination rate, germination potential, and germination index, but that they significantly inhibited seedling vigor index. The eight measured indices were classified into two component factors by principal component analysis, and the largest components related to seedling relative length and relative germination rate load, which could be used as main identification indices for quinoa drought resistance during the germination stage. The order of drought resistance of the tested cultivars (lines) was as follows: 'South Africa No. 2' > HTH-01 > 'Longli No. 4' > 'Longli No. 1' > HTH-y605. In terms of salt resistance, principal component analysis separated the eight indicators into three composition factors relating to the seedling relative length, relative germination rate, and relative germination index, respectively. The largest component factors can be used to identify quinoa cultivars (lines) with high salt resistance during germination. The order of salt resistance of the tested cultivars (lines) was as follows: HTH-01 > HTH-y605 > 'Longli No. 4' > 'Longli No. 1' > 'South Africa No. 2'. The drought resistance and salt tolerances of quinoa cultivars (lines) were sorted by the score function of the comprehensive factor of principal component analysis, and the results showed that 'Longli No. 4' had the strongest drought resistance, but the worst salt resistance. HTH-y605 had the strongest drought resistance as well as the strongest salt resistance. Correlation analysis showed that there was no significant correlation between drought resistance and salt tolerances of different quinoa cultivars (lines) at the germination stage. It was found that different quinoa cultivars (lines) were genetically diverse in terms of drought resistance and salt tolerance. The conclusion of this study provides a reference for research on the stress mechanisms of quinoa and for selective breeding of varieties, and provides theoretical and data to support the development of current low and medium yield fields.

Keywords: Quinoa; Germination stage; Drought stress; Salt stress; Drought resistance; Salt resistance

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)是苋科(Amaranthaceae)藜属(*Chenopodium* L.)一年生双子叶植物，是原产于南美洲的一种粮食作物，具有非常高的营养价值。在南美洲大陆具有几千年的栽培历史[1]。藜麦籽粒中蛋白质和植物活性物质含量较高，氨基酸比例协调，有“粮食之母”“黄金谷物”“神圣的食物”等称号，受到国内外专家学者以及消费者的广泛关注[2-3]。我国藜麦种植近年来呈现快速增长的态势，山西、吉林、青海、甘肃、河北等地开始较大面积地种植藜麦[4]。随着传统玉米(*Zea mays* L.)等粮食种植面积的政策性调减，藜麦迎来了重要的发展契机；特别是藜麦能够在低温[5-6]、干旱[7-8]和盐碱[9-10]条件下生长，具有较强的抗逆性；将会在我国北方干旱地区以及盐渍化土壤等边际性土地表现出极大的优势。因此，研究藜麦种子萌发阶段对干旱和盐胁迫的响应在生产上具有重要的指导意义。

种子萌发阶段是植物一生中抗逆性最敏感的时期之一。植物种子萌发阶段的抗逆性是一个极其复杂的生理现象，植物对不同的逆境会产生不同的生理生化响应。关于植物的抗旱与耐盐的相关性，前人[11-13]做了大量研究，杨帆[11]在甜高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]萌发期，用 100 mmol·L^{-1} NaCl 和等渗甘露醇模拟研究甜高粱盐害率和旱害率的隶属函数值，结果表明，甜高粱萌发期的抗盐性与抗旱性存在一定的正相关关系，抗盐强的品种一般抗旱性也强；但刘卓[12]研究苜蓿(*Medicago sativa* L.)发现，不同苜蓿品种表现的抗旱性与耐盐性的相关性不同；蒋锦鹏[13]采用隶属函数法对野生狼尾草[*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.]萌发期和幼苗生长期的多个指标进行抗旱、耐盐性评价，研究发现狼尾草的抗旱性与耐盐性之间无明显相关性。由此可见，同一植物不同品种之间抗旱性和耐盐性有可能完全不同。因此，比较研究同种植物在干旱胁迫和盐胁迫下响应变化，更利于植物抗旱、耐盐品种的选育及抗逆基因挖掘。

藜麦作为公认抗逆性强的作物之一，其对干旱和盐胁迫响应研究受到广泛重视。Schabes 等[14]发现，随着盐胁迫浓度的增加，藜麦的发芽率整体呈下降趋势。刘晓青[15]使用不同浓度的 NaCl 处理 4 个藜麦品种，随着 NaCl 浓度的增加，藜麦种子的相对盐害率不断升高，发芽受抑制作用显著增强。温日宇等[16]探究了不同浓度 PEG-6000 溶液对藜麦种子发芽的影响发现，随着 PEG-6000 浓度的升高，藜麦种子的发芽率、发芽势、下胚轴长和根长都呈现逐渐降低的趋势。宿婧等[17]研究却表明，适宜质量浓度的 PEG-6000 溶液能促进种子萌发，干旱条件能促进藜

麦种子中游离氨基酸含量的增加。以上研究多是关注单因素胁迫, 而对于藜麦萌发期抗旱性、耐盐性综合评价及其主要评价指标的研究较少。

本文采用 PEG-6000 和 NaCl 分别模拟干旱胁迫和盐胁迫处理, 对 5 个藜麦品种种子萌发阶段抗旱耐盐性指标进行了研究, 并利用主成分分析方法综合评价藜麦的抗旱性和耐盐性, 选择抗旱性和耐盐性的主要评价指标, 为中低产田开发作物种植的筛选提供理论和数据支持。

1　材料和方法

1.1　供试材料

供试的藜麦种子由宁夏农林科学院马维亮研究员提供, 品种名称见表 1。

表 1　供试藜麦品种(系)及来源

Table 1　Tested quinoa varieties (lines) and their source

品种 Variety (line)	粒色 Grain color	千粒重 1000-grain weight (g)	来源 Source
陇藜 4 号 Longli No. 4	白色 White	3.60	甘肃省 Gansu Province
HTH-y605	黑色 Black	2.44	山西省 Shanxi Province
南非 2 号 South Africa No. 2	白色 White	3.60	甘肃省 Gansu Province
HTH-01	白色 White	2.88	山西省 Shanxi Province
陇藜 1 号 Longli No. 1	白色 White	2.32	甘肃省 Gansu Province

1.2　试验处理

试验于 2019 年 3 月在北方民族大学植物生理生态实验室进行。设置 5 个 PEG-6000(购自北京索莱宝科技有限公司)梯度, 分别为蒸馏水处理(无胁迫对照)、−0.15 MPa、−0.30 MPa、−0.45 MPa、−0.60MPa, PEG-6000 胁迫溶液的配置参考 Michel 等[18]的方法; 设置 4 个 NaCl 浓度梯度, 分别为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%; 共计 9 个处理。挑选饱满、色泽和大小基本一致的藜麦种子经 10%的 $NaClO_3$ 溶液消毒 20 min 后用无菌水冲洗至干净无味, 用滤纸吸干种子表面水分后, 铺在放有双层滤纸的培养皿中, 每个培养皿准确摆放 30 粒种子, 加入 10 mL 处理液。每个处理重复 3 次, 将所有培养皿置于 12 h(25 ℃)光照/12 h(20 ℃)黑暗的人工气候培养箱中进行萌发试验, 试验期间每天更换培养基质, 以保证培养环境的恒定。

1.3　测定指标与方法

试验过程中, 每隔 12 h 观察记录种子萌发情况, 以胚根伸出种皮 2 mm 为萌发标准, 记录种子萌发个数后计算发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数, 为了消除不同品种间差异, 采用各指标的相对值来反映对胁迫的响应[19]。

$$发芽率=萌发种子数/供试种子数\times100\% \quad (1)$$

$$相对发芽率=(处理发芽率/对照发芽率)\times100\% \quad (2)$$

$$发芽势=第\ 3\ 天发芽种子数/供试种子数\times100\% \quad (3)$$

$$相对发芽势=(处理发芽势/对照发芽势)\times100\% \quad (4)$$

$$发芽指数=\sum G_t/t \quad (5)$$

式中: G_t 为 t 天内发芽的种子数, t 为相应的萌发天数。

$$相对发芽指数=(处理发芽指数/对照发芽指数)\times100\% \quad (6)$$

$$活力指数=\sum G_t/t\times S \quad (7)$$

式中: S 为平均幼苗长度。

$$相对活力指数=(处理活力指数/对照活力指数)\times100\% \quad (8)$$

7 d 后结束萌发, 从每个处理中随机选出 10 株幼苗, 用数字式游标卡尺测量长度, 用电子分析天平测量幼苗鲜重和干重。测干重前先 105 ℃烘 2 h 杀青, 后 80 ℃烘至恒重, 含水量=(鲜重−干重)/鲜重×100%, 相对长度=(处理长度/对照长度)×100%, 相对鲜重=(处理鲜重/对照鲜重)×100%, 相对干重=(处理干重/对照干重)×100%, 相对含水量=(处理含水量/ 对照含水量)×100%。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据统计处理, SPSS Statistic 21.0 进行主成分分析和相关性分析, GraphPad Prism 5.0 进行作图, 图表中参数的数据以平均值±标准差表示。

2　结果与分析

2.1　干旱和盐胁迫对藜麦种子发芽率动态变化的影响

由图 1 可知, 干旱和盐胁迫均可影响藜麦种子发芽进程。除‘HTH-01’外, PEG-6000 渗透势低于 −0.45 MPa 时, 干旱胁迫均对不同品种的藜麦萌发具有抑制作用, 延长了萌发的起始时间, 到达发芽高峰期的时间也推迟; 对于‘HTH-01’, 随着干旱胁迫的增强, 萌发的起始时间和到达发芽高峰期时间均推迟。不同浓度的 NaCl 胁迫均可延长萌发的起始时间(图 1), 当 NaCl 浓度超过 0.8%时, 盐胁迫明显影响‘陇藜 4 号’‘HTH-y605’‘南非 2 号’的萌发进程; NaCl 浓度为 1.6%时, 可推迟‘HTH-01’达到发芽高峰期的时间, 但对‘陇藜 1 号’的影响不大。同时从图 1 可以看出, 高浓度的 NaCl 处理后, 藜麦种子虽然

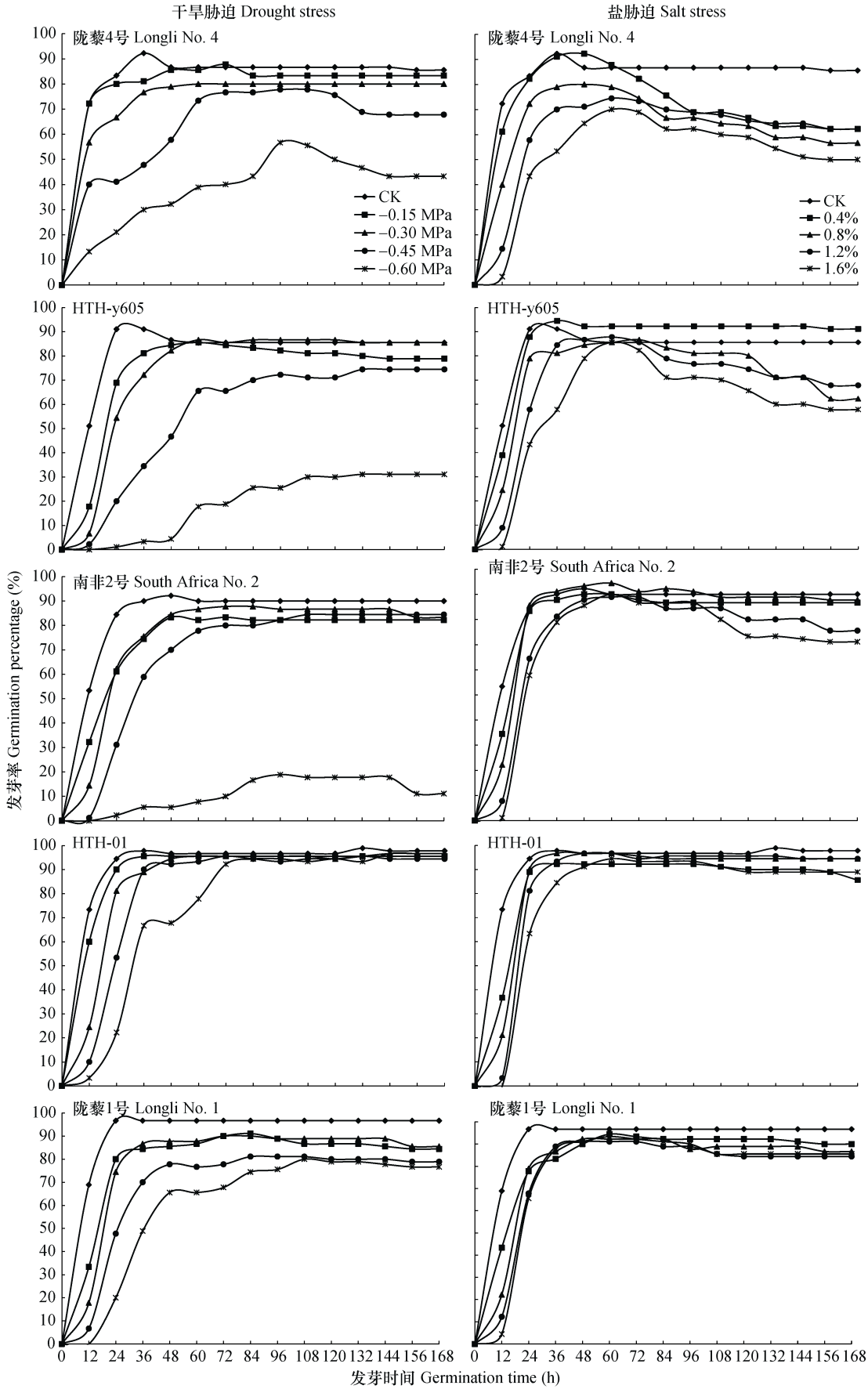

图 1 干旱和盐胁迫对不同藜麦品种(系)萌发进程的影响

Fig. 1 Effects of drought and salt stresses on germination of different quinoa varieties (lines)

能够萌发, 但萌发后会出现死苗现象。

2.2　干旱和盐胁迫对藜麦种子萌发指标的影响

2.2.1　干旱胁迫对藜麦种子萌发指标的影响

由图 2 可以看出, 干旱胁迫下, 与 CK 相比, 随着渗透势的降低, ‘陇藜 4 号’ ‘HTH-y605’ ‘南非 2 号’相对发芽率呈先升高后下降趋势, –0.60 MPa 的 PEG-6000 处理下‘陇藜 4 号’ ‘HTH-y605’ ‘南非 2 号’相对发芽率和相对发芽势显著低于 CK 处理(P<0.05); ‘陇藜 1 号’的相对发芽率随着渗透势的降低无显著变化, 相对发芽势随着渗透势的降低整体呈现下降趋势, –0.60 MPa 的 PEG-6000 处理的相对发芽势显著低于 CK 处理(P<0.05)。而对于相对发芽指数来说, ‘陇藜 4 号’随着渗透势的降低呈先升高后下降趋势, ‘HTH-y605’ ‘HTH-01’ ‘陇藜 1 号’随着渗透势的降低整体呈现下降趋势。‘HTH-y605’的相对活力指数随着渗透势的降低呈下降趋势, 其余品种则随着渗透势的降低呈先升高后下降趋势, 在–0.15 MPa 的 PEG-6000 处理下达最高值。

2.2.2　盐胁迫对藜麦种子萌发指标的影响

‘陇藜4号’萌发指标对盐胁迫的敏感明显高于其余品种(图2), 并且随着盐浓度的增高相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数和相对活力指数呈逐渐下降趋势; ‘HTH-y605’的相对发芽率、相对发芽势和相对发芽指数随着盐浓度的增加呈先升高后下降趋势, 在0.4%的 NaCl 处理下达最高值, 相对活力指数则呈逐渐下降趋势; ‘南非2号’的相对发芽率整

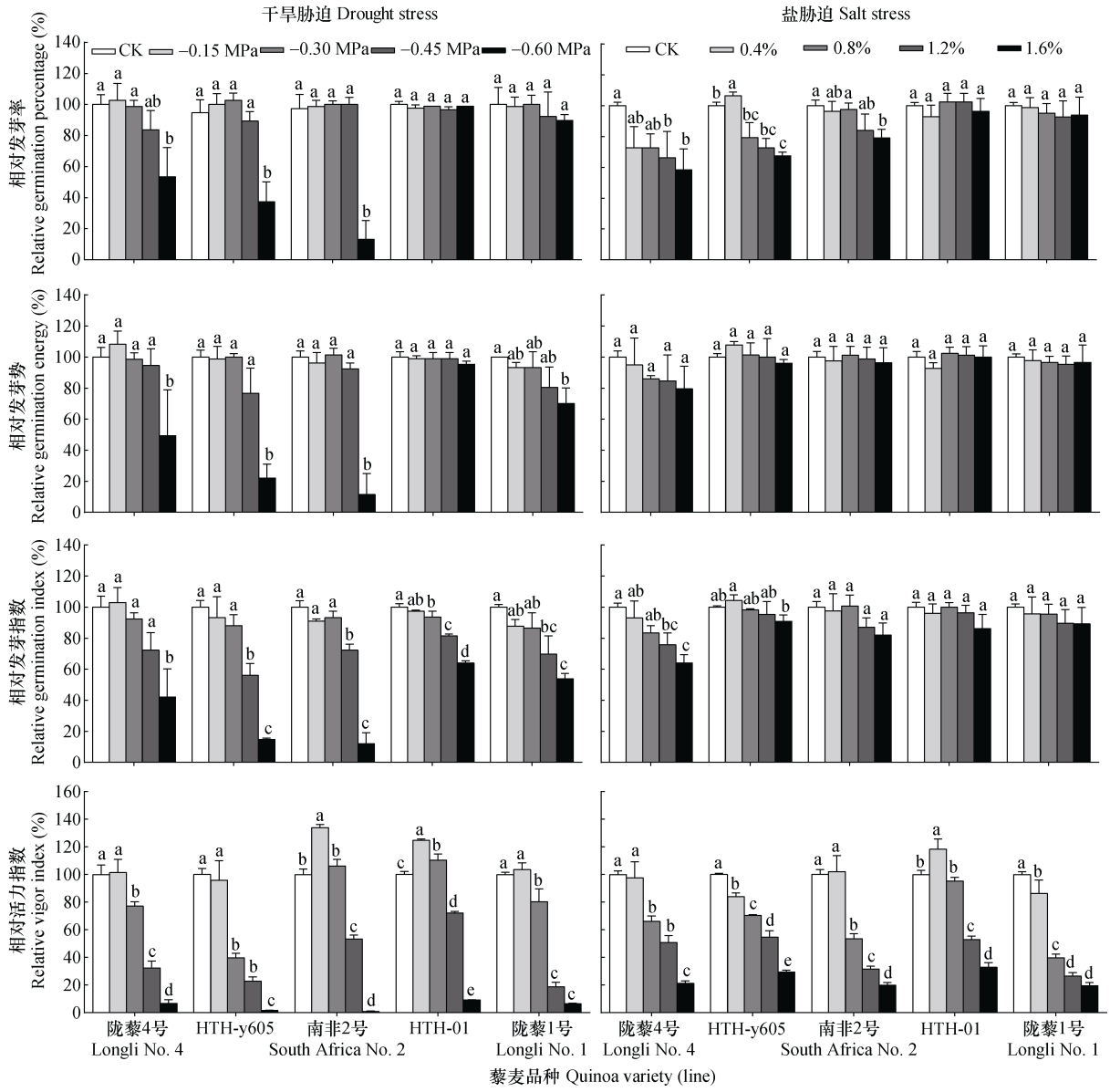

图 2　干旱和盐胁迫对不同藜麦品种(系)萌发指标的影响

Fig. 2　Effects of drought and salt stresses on germination indices of different quinoa varieties (lines)

不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters show significant differences among different treatments (P < 0.05).

体大致为下降趋势, 1.6%的 NaCl 处理的相对发芽率显著低于 CK 处理(P<0.05), 但其相对发芽势和相对发芽指数无显著下降; 随着盐浓度的增加, ‘HTH-01’相对发芽率、相对发芽势和相对发芽指数变化不明显, 相对活力指数呈先升高后下降趋势, 在 0.4%的 NaCl 处理下达最高值; ‘陇藜 1 号’的的相对发芽率、相对发芽势和相对发芽指数随着盐浓度的增加变化不明显, 其相对活力指数随着盐浓度的增加呈下降趋势。

2.3 干旱和盐胁迫对藜麦早期幼苗生长指标的影响

2.3.1 干旱胁迫对藜麦种子生长指标的影响

由图 3 和图 4 可知, ‘陇藜 4 号’的相对长度随着渗透势的降低逐渐减少; ‘HTH-y605’‘南非 2 号’‘HTH-01’和‘陇藜 1 号’的相对长度随着渗透势的降低呈先增大后减小趋势, 均在 −0.15 MPa 的 PEG-6000 处理下达最大值。藜麦早期幼苗的相对鲜重和相对含水量随着渗透势的降低逐渐减少, 从图 3 可以看出, ‘HTH-y605’的降幅明显高于其他品种; 不同品种藜麦早期幼苗的相对干重随着渗透势的降低呈先增大后减小趋势, 均在−0.30 MPa 的 PEG-6000 处理下达最大值。

2.3.2 盐胁迫对藜麦种子生长指标的影响

由图 3 和图 4 可知, ‘HTH-y605’和‘陇藜 1 号’的相对长度随着盐浓度的增加逐渐减少; ‘陇藜 4 号’‘南非 2 号’和‘HTH-01’的相对长度随着盐浓度的增加呈先增大后减小趋势, 均在 0.4%的 NaCl 处理

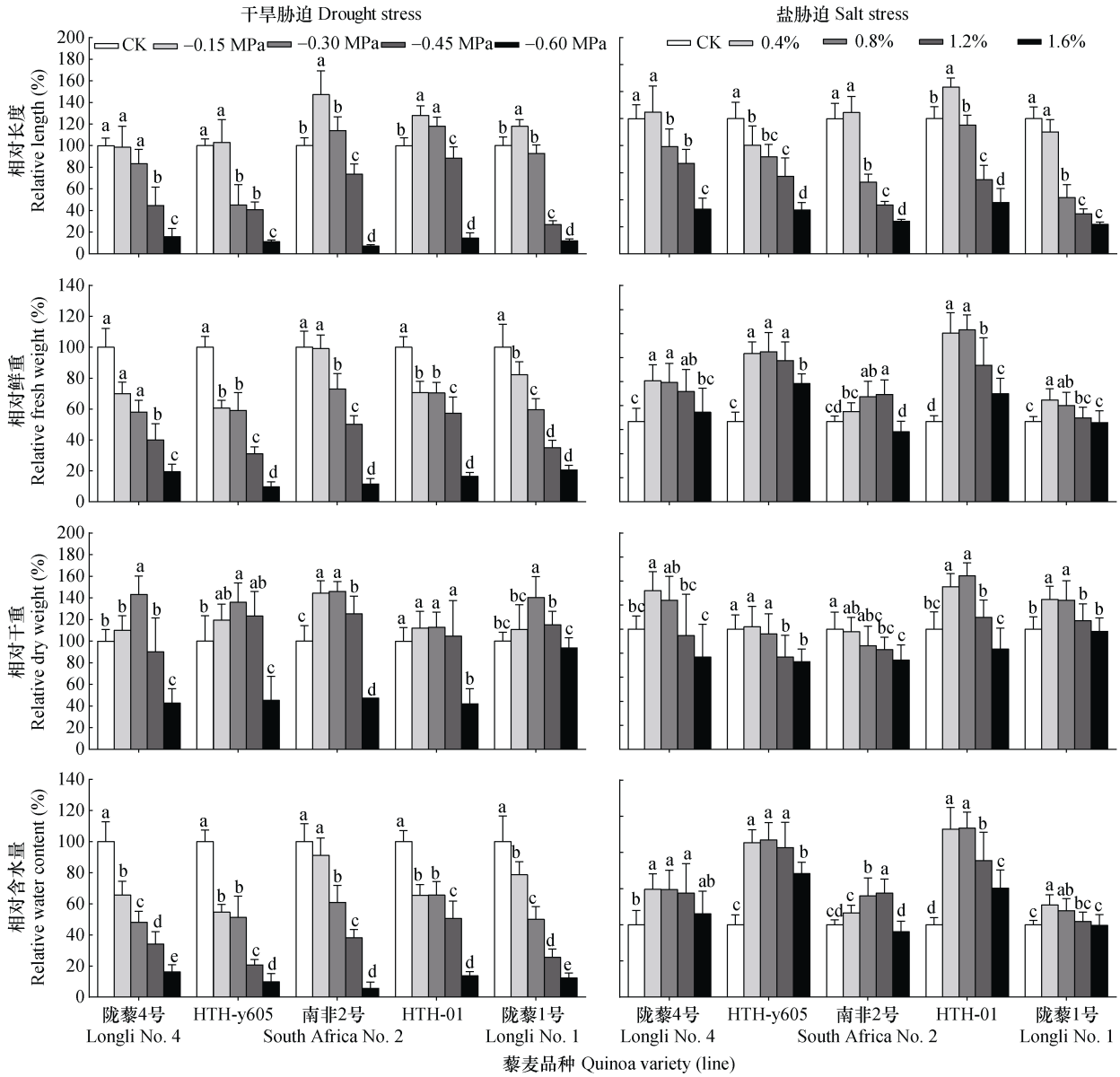

图 3 干旱和盐胁迫对不同藜麦品种(系)早期幼苗生长指标的影响

Fig. 3 Effects of drought and salt stresses on growth indices of early seedlings of different quinoa varieties (lines)

不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters showed significant differences among different treatments (P < 0.05).

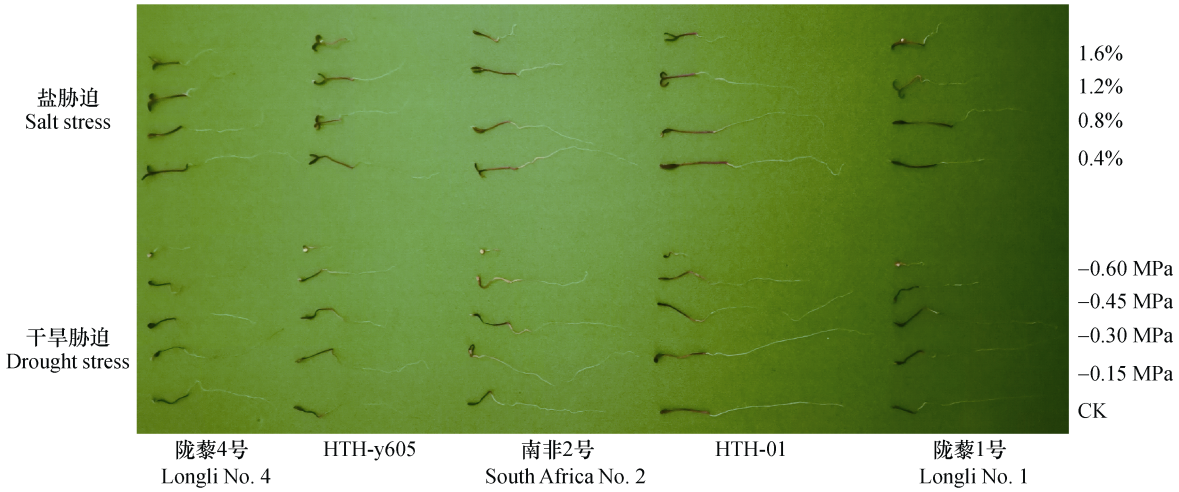

图 4　干旱和盐胁迫对不同藜麦品种(系)早期幼苗生长的影响

Fig. 4　Effects of drought and salt stresses on growth of early seedlings of different quinoa varieties (lines)

下达最大值。‘南非 2 号’的相对干重随着盐浓度的增加逐渐减少, ‘陇藜 4 号’ ‘HTH-y605’ ‘HTH-01’和‘陇藜 1 号’的相对干重随着盐浓度的增加呈先增大后减小趋势, ‘陇藜 4 号’ ‘HTH-y605’和‘陇藜 1 号’在 0.4%的 NaCl 处理下达最大值, ‘HTH-01’在 0.8%的 NaCl 处理下达最大值。所有品种的幼苗相对鲜重和相对含水量均随 NaCl 浓度增加先升高后降低, ‘南非 2 号’在 1.2%处理下达最大值, ‘陇藜 4 号’和‘陇藜 1 号’在 0.4%的 NaCl 处理下达最大值, ‘HTH-y605’和‘HTH-01’在 0.4%和 0.8%的 NaCl 处理下达最大值, 两者间差异不显著。

2.4　藜麦萌发期抗旱性、耐盐性主成分分析

主成分分析能够消除测定指标之间信息重叠带来的干扰, 从而综合分析植物的抗逆性。表 2 表明前 2 个主成分累计贡献率达 88.47%, 考虑到累计贡献率高于 85%的原则, 所以提取前 2 个主成分替代 8 个指标来评价藜麦萌发期抗旱性。前 3 个主成分累计贡献率达 85.21%, 所以提取前 3 个主成分替代 8 个指标来评价藜麦萌发期耐盐性。

表 3 为藜麦萌发期抗旱性主成分分析的 2 个主成分及耐盐性主成分分析的 3 个主成分与其 8 个指标之间的相关系数(载荷矩阵), 其数值反映了指标

表 2　藜麦萌发期抗旱性、耐盐性主成分分析的特征根及贡献率

Table 2　Characteristic roots and contribution rates of principal components analysis of drought tolerance and salt tolerance in germination of quinoa

胁迫 Stress	主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution (%)	累计贡献率 Cumulative contribution (%)
干旱胁迫 Drought stress	I	6.10	76.17	76.17
	II	0.98	12.30	88.47
盐胁迫 Salinity stress	I	3.62	45.23	45.23
	II	1.91	23.92	69.15
	III	1.28	16.05	85.21

表 3　藜麦萌发期抗旱性、耐盐性主成分分析的各因子载荷矩阵

Table 3　Factor loading matrix of principal component analysis of drought tolerance and salt tolerance of quinoa during germination

胁迫 Stress	主成分 Principal component	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
干旱胁迫 Drought stress	I	0.258	0.353	0.600	0.327	0.924	0.906	0.873	0.870
	II	0.922	0.892	0.767	0.667	0.280	0.368	0.389	0.430
盐胁迫 Salinity stress	I	0.020	0.420	−0.001	0.018	0.896	0.881	0.826	0.203
	II	0.866	0.822	0.017	0.181	0.272	0.396	−0.040	0.872
	III	0.219	0.216	0.954	0.879	−0.144	−0.122	0.253	−0.101

X_1: 相对发芽率; X_2: 相对发芽势; X_3: 相对发芽指数; X_4: 相对活力指数; X_5: 相对长度; X_6: 相对鲜重; X_7: 相对干重; X_8: 相对含水量。X_1: relative germination rate; X_2: relative germination potential; X_3: relative germination index; X_4: relative vigor index; X_5: relative length; X_6: relative fresh weight; X_7: relative dry weight; X_8: relative water content.

对主成分负荷相对大小和作用的方向，绝对值越大，说明关系越密切。抗旱性主成分分析中，第Ⅰ主成分贡献率为 76.17%，在第Ⅰ主成分中 X_5 和 X_6 的系数较大，说明相对长度和相对鲜重在第Ⅰ主成分有较大载荷，反映了干旱胁迫下藜麦早期幼苗的生长状况；第Ⅱ主成分贡献率为 12.30%，相对发芽率和相对发芽势在第Ⅱ主成分的载荷较大，反映了干旱胁迫下藜麦的萌发状况。耐盐性主成分分析第Ⅰ主成分贡献率为 45.23%，在第Ⅰ主成分相对长度和相对鲜重的载荷较大，反映了盐胁迫下藜麦早期幼苗的生长状况；第Ⅱ主成分贡献率为 23.92%，相对发芽率和相对含水量在第Ⅱ主成分具有较大载荷；第Ⅲ主成分贡献率为 16.05%，在第Ⅲ主成分 X_3 和 X_4 的载荷较大，反映了种子萌发时的综合指标。

结合 2 个主成分中每个指标所对应的系数(特征向量)，参照林海明等[20]的方法，以特征向量为权重根据主成分的计算公式分别构建藜麦萌发期抗旱性、耐盐性的主成分函数表达式，分别可得：

抗旱性：

$$Y_1=-0.251X_1-0.187X_2-0.002X_3+0.286X_4+0.305X_5+0.332X_6-0.106X_7+0.379X_8 \quad (9)$$

$$Y_2=0.483X_1+0.424X_2+0.239X_3-0.092X_4-0.119X_5-0.147X_6+0.290X_7-0.211X_8 \quad (10)$$

耐盐性：

$$Y_1=-0.102X_1-0.184X_2+0.028X_3+0.350X_4+0.386X_5+0.021X_6+0.434X_7-0.009X_8 \quad (11)$$

$$Y_2=0.421X_1+0.430X_2+0.315X_3+0.015X_4-0.051X_5-0.790X_6-0.235X_7+0.010X_8 \quad (12)$$

$$Y_3=-0.130X_1+0.041X_2+0.054X_3-0.079X_4-0.080X_5+0.520X_6+0.165X_7+0.464X_8 \quad (13)$$

单一的 Y_1、Y_2 和 Y_3 并不能对藜麦萌发期的抗旱性和耐盐性做出综合评价，以每个主成分所对应的特征值(主成分分析中矩阵正交化之后所对应特征向量对于整个矩阵的贡献程度)占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重计算主成分综合模型，抗旱性：$Y=0.861Y_1+0.139Y_2$，耐盐性：$Y=0.531Y_1+0.281Y_2+0.188Y_3$。根据主成分的线性组合以及综合得分公式，求得 5 种藜麦抗旱性、耐盐性的主成分得分和综合得分，结果如表 4 所示。5 种藜麦萌发期抗旱性从强到弱依次为：‘南非 2 号’>‘HTH-01’>‘陇藜 4 号’>‘陇藜 1 号’>‘HTH-y605’；5 种藜麦萌发期耐盐性从强到弱依次为：‘HTH-01’>‘HTH-y605’>‘陇藜 4 号’>‘陇藜 1 号’>‘南非 2 号’。

2.5 对藜麦种子萌发期抗旱性与耐盐性的相关性分析

通过对藜麦萌发期抗旱性与耐盐性的主成分综合得分值进行相关性分析，其结果为：藜麦萌发期的抗旱性与耐盐性的主成分综合得分值相关系数为 0.14，表明藜麦萌发期的抗旱性与耐盐性之间无明显相关性。

表 4 藜麦各品种(系)综合因子得分(*Y* 值)及抗逆性的排序
Table 4 Ranking of comprehensive factor score (*Y* value) and stress resistance of quinoa varieties (lines)

品种(系) Variety (line)	抗旱性 Drought resistance		耐盐性 Salinity resistance	
	Y	排序 Order	*Y*	排序 Order
陇藜 4 号 Longli No. 4	38.08	3	83.45	3
HTH-y605	30.98	5	88.28	2
南非 2 号 South Africa No. 2	51.73	1	76.35	5
HTH-01	50.57	2	98.53	1
陇藜 1 号 Longli No. 1	36.02	4	77.41	4

3 讨论与结论

种子萌发期对干旱和盐环境响应的研究关系到藜麦能否在边际性土地进行规模化种植。而发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数是评价种子萌发的常用指标，反映出种子的萌发能力[21-22]。植物从种子转化到幼苗过程中所需的物质及能量是由种子中贮藏的有机物提供，因此在种子萌发过程中幼苗长度、鲜重、干重等指标能体现出植物种苗转化状况[23]。干旱和盐胁迫对植物体均能造成渗透胁迫效应，除此之外，盐胁迫可造成植物体内离子平衡失调、有毒物质积累等影响，从而抑制植物生长发育。胁迫条件下植物的发芽率及外部形态是受胁迫影响的直接表现，胁迫越大，出苗率越低，从而影响后期发育以及产量[24]。在本研究中，不同胁迫对藜麦的发芽率、发芽势和发芽指数影响不大，却明显抑制活力指数，这可能是由于在种子萌发时的吸胀吸水阶段主要是物理过程,藜麦种子内的可水合的物质含量较高，导致其种皮的渗透势较低，利于其从环境中进行吸水作用，在细胞水合后很短时间内生理活动便启动，很快出现萌发完成的标志物胚根出现，而胁迫明显抑制其伸长，因此胁迫对藜麦种子发芽率、发芽势和发芽指数的影响不大，但显著抑制活力指数。

植物的抗逆性作为与环境因素密切相关的数量性状，不能够单一的使用某个指标进行综合评价[19]。对于植物抗逆性的研究，主成分分析已在甜高粱[19,25]、谷子(*Setaria italica* Beauv)[26]、燕麦(*Avena sativa* L.)[27-28]等植物抗逆性的综合评价中得到广泛运用，此方法可以消除各指标信息重叠的干扰进行综合分析，从而对试验材料的抗逆性进行有效、准确的评定。吴奇等[19]和孙璐等[25]认为发芽率和根长可作为高粱萌发期抗旱性和耐盐性的可靠指标，并

通过综合因子得分函数进行抗逆性排序。陈新等[27]认为种子活力指数是燕麦萌发期抗旱性鉴定的优选指标, 而陶金等[28]研究表明发芽指数和发芽率是燕麦萌发期耐盐性的主要评价指标。前人对作物的抗旱性与耐盐性主要鉴定指标提出不同的观点, 对不同的植物抗旱性与耐盐性的评价可能需要不同的指标进行鉴定。在本研究中, 对藜麦萌发期抗旱性综合评价中, 通过主成分分析将 8 个指标归类为 2 个成分因子, 各成分分别以相对长度和相对发芽率负荷量最大, 即可作为藜麦萌发期抗旱性主要鉴定指标; 对藜麦萌发期耐盐性综合评价中, 通过主成分分析将 8 个指标归类为 3 个成分因子, 相对长度、相对发芽率和相对发芽指数分别为各成分因子上最大的载荷, 可以作为藜麦萌发期耐盐性主要鉴定指标。

植物在生长发育过程中会遇到不同的胁迫环境, 因此在漫长的进化过程中植物会形成各种抗逆机制, 从而更好地抵抗或适应胁迫环境[13]。植物的抗旱性和耐盐性是一个复杂的过程, 不同的生长发育阶段植物的抗旱性与耐盐性具有很大差别[29]。樊海燕[30]对披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)与野大麦[*Hordeum brevisubulatum* (Trin.) Link]杂种‘BC1F3’萌发期的抗旱性与耐盐性分别进行了研究, 认为 8 种供试材料抗旱性与耐盐性并无明显关联, 例如披碱草的抗旱性排名第 2, 而其耐盐性排名第 8。本研究采用主成分分析的综合因子得分函数对藜麦萌发期抗旱性与耐盐性进行排序发现, ‘陇藜 4 号’的抗旱性最强, 而其耐盐性最差, ‘HTH-y605’的抗旱性与耐盐性均比较强。对藜麦的抗旱性与耐盐性进行相关性分析, 结果显示藜麦萌发期的抗旱性与耐盐性之间无明显相关性。这与吴晓凤等[31]在 10 种菊科(Asteraceae)植物以及董梅[32]在几种柴达木地区主要树种抗旱性与耐盐性比较的研究结果一致。

参考文献 References

[1] 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

[2] RIZZELLO C G, LORUSSO A, MONTEMURRO M, et al. Use of sourdough made with quinoa (*Chenopodium quinoa*) flour and autochthonous selected lactic acid bacteria for enhancing the nutritional, textural and sensory features of white bread[J]. Food Microbiology, 2016, 56: 1–13

[3] WANG S N, ZHU F. Formulation and quality attributes of quinoa food products[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(1): 49–68

[4] 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
REN G X, YANG X S, YAO Y. Current situation of quinoa industry in China[J]. Crops, 2015, (5): 1–5

[5] RUIZ K B, BIONDI S, OSES R, et al. Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(2): 349–359

[6] GARCIA M, RAES D, JACOBSEN S E, et al. Agroclimatic constraints for rainfed agriculture in the Bolivian Altiplano[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 71(1): 109–121

[7] VACHER J J. Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1998, 68(1/2): 99–108

[8] JACOBSEN S E, LIU F L, JENSEN C R. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(2): 281–287

[9] HARIADI Y, MARANDON K, TIAN Y, et al. Ionic and osmotic relations in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants grown at various salinity levels[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 185–193

[10] RUFFINO A M C, ROSA M, HILAL M, et al. The role of cotyledon metabolism in the establishment of quinoa (*Chenopodium quinoa*) seedlings growing under salinity[J]. Plant and Soil, 2010, 326(1/2): 213–224

[11] 杨帆. 甜高粱在萌发期和苗期抗盐性与抗旱性比较研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015: 36–42
YANG F. Comparative studies on salt resistance and drought resistance of sweet sorghums at the stage of germination and seedlings[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015: 36–42

[12] 刘卓. 不同苜蓿品种耐盐性、抗旱性比较的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008: 37–39
LIU Z. Study and appraisal of salt tolerance drought resistance capacity of different alfalfa cultivars[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008: 37–39

[13] 蒋锦鹏. 野生狼尾草萌发期和幼苗期抗旱性、耐盐性的综合分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 32–37
JIANG J P. The comprehensive analysis of drought and salt tolerance of wild *Pennisetum* at germination and seedling stage[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014: 32–37

[14] SCHABES F I, SIGSTAD E E. Calorimetric studies of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seed germination under saline stress conditions[J]. Thermochimica Acta, 2005, 428(1/2): 71–75

[15] 刘晓青. NaCl 胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生理生化特性的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016: 21–25
LIU X Q. Effects of NaCl stress on seed germination and physiological and biochemical of seedling in *Chenopodim quinoa*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016: 21–25

[16] 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

[17] 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

[18] MICHEL B E, KAUFMANN M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. Plant Physiology, 1973, 51(5): 914–916

[19] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 等. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1233–1246
WU Q, ZHOU Y F, GAO Y, et al. Screening and identification for drought resistance during germination in sorghum cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(8): 1233–1246

[20] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005, 22(3): 65–69
LIN H M, ZHANG W L. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software — to discuss with comrade Liu Yumei, Lu Wendai etc[J]. Statistical Research, 2005, 22(3): 65–69

[21] 陈锋, 孟永杰, 帅海威, 等. 植物化感物质对种子萌发的影响及其生态学意义[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 36–46
CHEN F, MENG Y J, SHUAI H W, et al. Effect of plant allelochemicals on seed germination and its ecological significance[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 36–46

[22] 邓小红, 姬拉拉, 王锐洁, 等. 红豆和白扁豆种子萌发和生长对盐胁迫的响应及其生理机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019: 27(8): 1218–1225
DENG X H, JI L L, WANG R J, et al. Response of seed germination and physiological mechanism of *Vigna angularis* and *Dolichos lablab* to salt stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1218–1225

[23] 王志恒, 魏玉清, 邹芳, 等. PEG-6000 和盐碱胁迫对甜高粱种子萌发影响研究[J]. 种子, 2019, 38(5): 39–43
WANG Z H, WEI Y Q, ZOU F, et al. Study on effects of PEG-6000 and saline-alkali stress on seed germination of sweet sorghum[J]. Seed, 2019, 38(5): 39–43

[24] 姚海梅, 李永生, 张同祯, 等. 旱-盐复合胁迫对玉米种子萌发和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2301–2307
YAO H M, LI Y S, ZHANG T Z, et al. Effects of combined drought and salinity stress on germination and physiological characteristics of maize (*Zea mays*)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2301–2307

[25] 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 等. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1714–1722
SUN L, ZHOU Y F, WANG C, et al. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1714–1722

[26] 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

[27] 陈新, 宋高原, 张宗文, 等. PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6): 1188–1195
CHEN X, SONG G Y, ZHANG Z W, et al. Identification and evaluation of drought resistance of naked oat (*Avena nuda* L.) under PEG-6000 stress at germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(6): 1188–1195

[28] 陶金, 侯龙鱼, 杨杰, 等. 燕麦萌发耐盐性及指标筛选[J]. 草业科学, 2018, 35(10): 2414–2421
TAO J, HOU L Y, YANG J, et al. Comparative studies on seed germination characteristics and indicators of oat varieties under salt stress[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(10): 2414–2421

[29] 王敏姿. 马里兰百日草扎哈拉系列植物抗旱性与耐盐性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010: 10–14
WANG M Z. Study on response of *Z. marylandica* Zahara series to drought and salt stress[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2010: 10–14

[30] 樊海燕. 披碱草与野大麦杂种 BC_1F_3 代抗旱耐盐性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012: 40–41
FAN H Y. Study on the drought resistance and salt tolerance of the hybrid BC_1F_3 between *Elymus dahuricus* and *Hordeum brevisubulatum*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012: 40–41

[31] 吴晓凤, 倪沛, 杨涛, 等. 10 种菊科植物的抗旱性与抗盐性评价[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 1959–1968
WU X F, NI P, YANG T, et al. Evaluation of drought and salt resistance of 10 species from Asteraceae[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 1959–1968

[32] 董梅. 柴达木地区主要树种抗旱耐盐生理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013: 115–118
DONG M. Drought and salinity resistant physiology and of main tree species in Qaidam of China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013: 115–118