



干旱胁迫对不同苦荞品种苗期生长 和根系生理特征的影响

路之娟¹, 张永清^{1,2*}, 张 楚¹

(1 山西师范大学 生命科学学院, 山西临汾 041004; 2 山西师范大学 地理科学学院, 山西临汾 041004)

摘 要: 采用盆栽人工控水试验, 研究了不同水分处理(正常供水、中度干旱和重度干旱)对耐旱型(‘迪庆苦荞’、‘西农 9909’)和不耐旱型(‘西荞 1 号’和‘黑丰 1 号’)苦荞品种苗期生理、形态指标的影响, 并通过隶属函数法与主成分分析对品种抗旱性进行综合评价, 以揭示苦荞苗期的抗旱生理机制。结果表明: (1) 与正常供水相比, 除‘迪庆苦荞’和‘西农 9909’在重度干旱胁迫下主根长呈升高趋势外, 其余苦荞品种在 2 个干旱条件下的株高、茎粗、叶面积、地上部干重、地下部干重、根系体积、根系表面积均呈下降趋势, 且耐旱品种降幅小于不耐旱品种; 重度干旱胁迫使得‘迪庆苦荞’的根冠比升高, 而其余品种根冠比在干旱胁迫下均无显著变化。(2) 干旱胁迫使苦荞叶片的叶绿素含量、相对含水量、最大荧光产量(F_m)、最大光化学效率(F_v/F_m)、根系活力和可溶性蛋白含量显著降低, 而根系超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)、可溶性糖及游离脯氨酸含量呈升高趋势; 不同抗旱性品种间的升降幅度存在差异。(3) 各苦荞品种耐旱能力综合评价值(D)表现为‘迪庆苦荞’>‘西农 9909’>‘黑丰 1 号’>‘西荞 1 号’; 幼苗株高、地下部干重及根系 SOD 活性和蛋白质含量与 D 值呈显著正相关关系, 而根系脯氨酸含量和可溶性糖含量与 D 值呈极显著正相关关系。研究发现, 在中度与重度干旱逆境下, 苦荞品种‘迪庆苦荞’和‘西农 9909’综合表现较好, 具有更强的耐旱能力, 而品种‘西荞 1 号’和‘黑丰 1 号’综合表现较差, 其抗旱性较弱; 苗期株高、地下部干重以及根系 SOD 活性、蛋白质含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量可作为苦荞抗旱性快速鉴定的指标。

关键词: 苦荞; 苗期; 干旱胁迫; 形态指标; 生理指标

中图分类号: Q945.78; S517 **文献标志码:** A

The Seedling Growth and Root Physiological Traits of *Fagopyrum tataricum* Cultivars under Drought Stress

LU Zhijuan¹, ZHANG Yongqing^{1,2*}, ZHANG Chu¹

(1 School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China; 2 College of Urban and Environment Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China)

Abstract: In order to study the effects of physiological, morphological indexes and the physiological mechanism on drought stress for *Fagopyrum tataricum* cultivars, we took the pot experiment of artificial water control and three water treatments included normal irrigation, moderate water stress, and heavy water stress. The experimental materials included ‘Diqing’, ‘Xinong9909’, ‘Heifeng1’ and ‘Xiqiao1’. Three results were drawn from this experiment. (1) Compared to the normal water treatment, the main root length of ‘Diqing’ and ‘Xinong9909’ increased under the heavy water stress; The plant height, stem di-

收稿日期: 2017-10-09; 修改稿收到日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571604)

作者简介: 路之娟(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: luzhijuan1992@126.com

* 通信作者: 张永清, 教授, 硕士生导师, 主要从事土壤及植物生理生态研究。E-mail: yqzhang208@126.com

ameter, leaf area, shoot dry weight, root dry weight, root volume, root area of ‘Heifeng1’ and ‘Xiqiao1’ decreased, and the decrease of drought tolerant cultivars were less than those of non-drought tolerant cultivars. Besides, the drought stress made root/shoot ratio increased of ‘Diqing’ and declined of other cultivars. (2) Drought stress could make chlorophyll content, leaf relative water content, F_m , F_v/F_m , root activity and soluble protein content significantly decreased, but superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, malonaldehyde (MDA) content, soluble sugar content and free proline content increased. Also, there were differences of up or down for different varieties. (3) Subordination function method and principal component analysis were used to synthetically evaluate the drought resistance of different *F. tataricum* genotypes. We found out that the resistance ranking (‘Diqing’ > ‘Xinong9909’ > ‘Heifeng1’ > ‘Xiqiao1’). The results of correlation analysis showed that plant height, root dry weight, dismutase (SOD) activity, soluble protein content were significantly correlated with D value and the proline content and soluble sugar content were very significantly correlated with D value. The study has shown that ‘Diqing’ and ‘Xinong9909’ had the best performance for the indexes of various aspects under two kinds of drought conditions, thus we could conclude that these cultivars had better adaptability under drought environment. ‘Heifeng1’ and ‘Xiqiao1’ had the poor performance, which showed low drought resistance. At the same time, plant height, root dry weight, dismutase (SOD) activity, soluble protein content, proline content and soluble sugar content can be used as indicators for the rapid determination of drought resistance.

Key words: *Fagopyrum tataricum*; seedling stage; drought stress; morphological characteristics; physiological parameters

随着人们生活需求由温饱型向营养型乃至保健型的转化,苦荞的“三降一疗两通”食疗营养功能日益受到消费者的青睐^[1-2]。苦荞(*Fagopyrum tataricum* L.)为蓼科(Polygonaceae)双子叶植物,是起源于中国西南部的一种古老的杂粮作物。其含有丰富的矿物质、维生素、脂肪、蛋白质和人体所需的微量元素^[3-4],更具备其他植物所不具有的黄酮类化合物,使其药食兼用的作用更为突出,因此常被称为“五谷之王”、“三降食品”。苦荞生育期短,耐冷凉、耐瘠薄、适应性强,在黄土高原地区具有明显的区位优势和生产优势,是当地特色农业发展的重要杂粮作物。

相关研究表明,全球因水源匮乏而导致的减产超过了其他自然灾害造成减产数量的总和^[5]。山西素有“十年九旱”之说,干旱是影响该省农业高产稳产的重要逆境因素^[6]。根系是作物感受土壤干旱的原初部位与敏感部位,其数量大小、分布和生理状况等直接影响着作物抗旱性的强弱,因而研究根系对干旱胁迫的生理生态反应,对于揭示作物抗旱的本质更有意义^[7]。研究苦荞根系对水分胁迫的响应特征,探明其抗旱机理与调控对策,对实现山西黄土高原丘陵区旱地农业可持续发展及保障粮食安全具有重要的意义。现有关于苦荞的研究多集中于种质资源^[8]、农艺性状^[9-10]、药用与营养价值^[11-12]、栽培技术^[13-14]、养分吸收与施肥的增产作用^[15-17]、逆境胁迫

对苦荞化学成分及生理指标影响等方面^[18-22],而对苦荞的抗逆性机理则研究较少,尤其是关于干旱胁迫对苦荞根系生理特性的影响更是鲜有报道。本试验拟以前期筛选的不同耐旱性苦荞品种为材料,通过盆栽控水试验研究不同水分条件下不同耐旱性苦荞品种的苗期生长及根系生理生态状况,比较不同抗旱性品种间的变化差异,探明与苦荞抗旱性密切相关的生理生态指标,并最终为黄土高原苦荞抗旱品种的种植、引种、选育及抗旱机制等方面的研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为经前期预实验筛选出的耐旱苦荞品种‘迪庆苦荞’、‘西农 9909’和不耐旱品种‘西荞 1 号’、‘黑丰 1 号’。4 个品种生育期无明显差异,均为 105 d 左右。

1.2 试验处理

试验于 2017 年 5~6 月在山西师范大学塑料大棚内进行。试验采用二因素完全随机设计,因素 A 为不同耐旱性苦荞品种:‘迪庆苦荞’、‘西农 9909’、‘西荞 1 号’和‘黑丰 1 号’;因素 B 为不同水分处理:正常供水(土壤含水量为田间持水量的 65%~75%,CK)、中度干旱(土壤含水量为田间持水量的 45%~55%,MS)和重度干旱(土壤含水量为田间持

水量的 25%~35% ,SS),共 12 个处理组合,每个处理重复 3 次,每天采取称重法浇水。

采用砂培盆栽试验,营养钵大小为 16 cm×14 cm,每盆装入 1.5 kg 细沙,沙子使用前用去离子水洗净、晾干备用。每盆精选籽粒饱满均匀且无病虫害的种子 14 粒,播后正常供应水分,幼苗 2 叶 1 心后间苗,每盆定苗 7 株。3 叶 1 心后开始进行各水平的水分处理,为了保证试验期间幼苗生长不受养分限制,每盆定量浇灌 2.5 L 相同浓度的霍格兰营养液,其成分及含量为:Ca(NO₃)₂ 820.7 mg·L⁻¹、KNO₃ 505.6 mg·L⁻¹、MgSO₄·7H₂O 616.2 mg·L⁻¹、KH₂PO₄ 272.2 mg·L⁻¹,微量元素和铁盐同霍格兰标准营养液,每 5 d 每盆浇灌同等营养液 1 次,处理 20 d 后(显蕾期)开始测定相关指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标 叶面积用叶面积仪法测定;株高、最大根长用直接测量法;生物量用烘干后称重法;根系的总长、根总表面积、根体积用英国产 Delta-T SCAN 根系分析系统测定;叶片相对含水量(RWC)用称重法测定^[23]。

1.3.2 生理指标 叶绿素含量用分光光度计测定^[23];用美国 Opti2science 公司生产的 OS52FL 调制式叶绿素荧光仪于取样前一天早上(5:00~8:00,弱光环境下)测定最上一片定型叶的叶绿素荧光参数初始荧光 F_0 和最大荧光产量 F_m ,并计算可变荧光 $F_v(F_m - F_0)$ 、PSⅡ最大光化学量子产量 F_v/F_m 。超氧化物歧化酶(SOD)活性用蓝四唑法测定^[23];过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚比色法测定^[23];丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸法测定^[23];可溶性糖含量用蒽酮比色法测定^[23];可溶性蛋白质含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[23]。以上指标均重复 3 次,取平均值。

1.4 品种苗期抗旱性综合评价

采用模糊数学隶属函数法^[24]对苦荞品种苗期的抗旱性进行综合评价。设有 n 个苦荞品种($n = 1, \dots, i$),每个苦荞品种有 m 个抗旱性指标($m = 1, \dots, j$), D_{ij} 和 W_{ij} 分别表示第 i 个苦荞品种、第 j 个抗旱指标的隶属度值和权重系数。

(1)标准化转化原始数据:

抗旱指标与抗旱性呈正相关时:

$$u(x_j) = (x_j - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

抗旱指标与抗旱性呈负相关时:

$$u(x_j) = 1 - (x_j - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

(2)权重系数(W_j)计算:

$$V_j = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}}{\bar{x}_j} \quad (3)$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (4)$$

(3)隶属函数值(D)计算:

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(x_j) \times W_j], j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中, $u(x)$ 表示数据标准化值, x_{\max} 表示第 j 个指标的最大值, x_{\min} 表示第 j 个指标的最小值, V_j 代表标准差系数,比较品种最终所得抗旱隶属度值。

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行处理分析,采用 Duncan's 法进行多重比较,用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对苦荞幼苗植株幼苗生长的影响

2.1.1 地上部生长 在干旱胁迫条件下,各苦荞品种苗期株高、茎粗、叶面积及地上部干重均显著降低($P < 0.05$),且随着胁迫程度的加剧下降幅度也更大(表 1)。其中,与正常供水处理(CK)相比,苦荞幼苗株高、茎粗、叶面积及茎叶干重在两个干旱胁迫环境下(MS 和 SS)分别平均显著降低了 21.25%、17.00%、35.13% 和 36.62%,即干旱胁迫对上述生长指标的影响表现为茎叶干重 > 叶面积 > 株高 > 茎粗。同时,不同耐旱型苦荞品种之间相比较,重度(SS)和中度(MS)干旱胁迫下各苦荞品种的上述指标虽均比正常供水处理显著降低,但耐旱品种的平均降幅均小于不耐旱品种,且差异显著($P < 0.05$)。以上结果说明耐旱性苦荞品种在干旱环境中表现出更强的地上部生长优势,受干旱胁迫的影响相对较小,适应性更强。

2.1.2 根系生长 在干旱胁迫条件下,各苦荞品种幼苗的根系体积和根系表面积、根系干重均比正常水分处理(CK)显著降低($P < 0.05$),且随着干旱胁迫程度的增加,降幅也随之加大;与耐旱性品种相比较,不耐旱品种根系相关指标降低的幅度更大(表 2)。在两个干旱环境中,耐旱品种根系体积、根系表面积和地下部干重的平均降幅分别为 31.00%、21.50% 和 31.25%,不耐旱品种的相应降幅分别为 51.50%、47.50% 和 42.75%。同时,与 CK 处理根冠比相比,仅耐旱品种‘迪庆苦荞’在重度胁迫(SS)

下显著上升了 7.00%,其余品种在两种干旱胁迫下均无显著变化。另外,与 CK 主根长相比,两种耐旱型品种在中度干旱胁迫(MS)下显著降低,而在 SS 下显著增加,但不耐旱品种则在 2 种干旱胁迫下均显著下降,且在 SS 胁迫下降幅更大。可见,干旱条件下,耐旱型苦荞在一定程度上可通过促进主根伸长来增加根系吸收范围,而不耐旱品种适应性较弱,表现为主根长长度持续降低;干旱胁迫使‘迪庆苦

荞’苦荞根冠比有所升高,其通过增加根冠比增强了干旱适应性。

2.2 干旱胁迫对苦荞幼苗叶片生理指标的影响

2.2.1 叶绿素含量和叶片相对含水量 由表 3 可知,4 个苦荞品种叶片叶绿素含量在两个干旱胁迫(MS、SS)下均比 CK 显著下降($P<0.05$)。其中,不耐旱品种‘黑丰 1 号’叶绿素含量降幅最大,分别达 31.00%和 58.00%,而品种‘西荞 1 号’次之,耐旱

表 1 水分胁迫条件下苦荞苗期地上部植株生长的变化

Table 1 The shoot growth of *F. tataricum* at seedling stage under water stress

品种 Cultivar	干旱处理 Drought treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶面积 Leaf area/mm ²	茎叶干重 Shoot dry weight/g
迪庆苦荞 DQ	CK	23.97±0.56aA	2.82±0.14aA	1308.74±2.91aA	0.406±0.008aA
	MS	21.68±0.77bA	2.54±0.13bA	1002.23±14.71bA	0.271±0.008bA
	SS	17.86±0.06cA	2.34±0.08bA	857.09±4.73cA	0.259±0.006bA
西农 9909 XN9909	CK	20.98±0.33aB	2.65±0.12aA	1145.38±7.89aB	0.259±0.013aB
	MS	19.15±0.46bB	2.35±0.04bB	913.82±5.15bB	0.181±0.01bB
	SS	15.90±0.84cB	2.20±0.02cB	758.36±4.02cB	0.159±0.003cB
西荞 1 号 XQ1	CK	15.93±0.49aC	2.06±0.08aB	629.35±4.54aD	0.211±0.010aC
	MS	13.32±0.64bC	1.68±0.05bC	410.55±7.62bD	0.138±0.008bC
	SS	10.30±0.68cC	1.62±0.06bC	316.94±4.25cD	0.124±0.004bD
黑丰 1 号 HF1	CK	16.28±0.54aC	2.04±0.02aB	694.14±6.54aC	0.236±0.001aB
	MS	13.43±0.51bC	1.63±0.09bC	453.93±9.94bC	0.149±0.005bC
	SS	10.70±0.82cC	1.59±0.05bC	353.93±9.94cC	0.136±0.004cC

注:CK. 对照;MS. 中度胁迫;SS. 重度胁迫;表内数据为平均值±标准误;同列数据后不同大、小写字母分别表示品种间或处理间差异达 0.05 显著水平($P<0.05$)。下同

Notes: CK. Normal irrigation; MS. Moderate water stress; SS. Heavy water stress. Values are mean ± SE. Different capital or normal letters in the same column indicate significant difference among different cultivars or treatments at 0.05 level. The same as below

表 2 水分胁迫对苦荞苗期根系形态指标的影响

Table 2 Effect of water stress on the development of root morphological indicators of *F. tataricum* at seedling stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	主根长 Main root length/cm	根体积 Root volume/cm ³	根表面积 Root area/mm ²	根系干重 Root dry weight/g	根冠比 Root-shoot ratio
迪庆苦荞 DQ	CK	23.41±0.90bA	5.68±0.05aA	4793.15±63.86aA	0.081±0.0011aA	0.198±0.001cB
	MS	20.34±0.63cA	4.50±0.40bA	4298.43±78.12bA	0.057±0.001bA	0.210±0.003bB
	SS	25.79±0.69aA	3.72±0.04cA	3242.55±49.03cA	0.055±0.0013bA	0.225±0.002aA
西农 9909 XN9909	CK	17.08±0.62bB	3.39±0.03aB	3676.14±86.24aB	0.058±0.0021aB	0.245±0.009aA
	MS	14.31±0.45cC	2.44±0.04bB	3309.48±31.13bB	0.044±0.0069bB	0.239±0.025aA
	SS	19.51±0.69aB	2.05±0.06cB	2417.53±41.81cB	0.036±0.0061bB	0.223±0.037aA
西荞 1 号 XQ1	CK	16.89±0.35aB	1.90±0.03aD	2415.75±20.45aD	0.029±0.0004aD	0.136±0.008aC
	MS	13.16±0.86bC	0.85±0.06bD	1411.83±27.63bC	0.018±0.0004bC	0.130±0.007aC
	SS	11.84±0.71bC	0.65±0.05cD	971.03±17.6lcD	0.016±0.0004cC	0.126±0.003aB
黑丰 1 号 HF1	CK	18.38±1.05aB	2.38±0.02aC	2552.36±70.56aC	0.032±0.0004aC	0.129±0.006aC
	MS	15.03±0.99bBC	1.64±0.08bC	1667.1±288.31bC	0.019±0.0022bC	0.127±0.012aC
	SS	13.78±0.87bC	1.10±0.09cC	1186.93±47.56cC	0.017±0.0005cC	0.122±0.007aB

品种‘西农 9909’和‘迪庆苦荞’重度胁迫下降幅均仅为 25%。叶片相对含水量同叶绿素含量的变化趋势相似,‘迪庆苦荞’、‘西农 9909’、‘西荞 1 号’和‘黑丰 1 号’在中度胁迫下分别比 CK 下降 2%、6.00%、19.00%和 19.00%,在重度胁迫下分别降低了 22.00%、25.00%、30.00%和 29.00%。可见,耐旱品种叶绿素含量和叶片含水量降幅小于不耐旱品种,其在干旱环境中仍能保持相对较高的叶绿素含量和含水量,从而保证自身有较强的光合能力,同时较高的含水量维持了体内正常的生理代谢活动,表现出较强抗旱性。

2.2.2 叶片荧光参数 各苦荞品种叶片的初始荧光产量(F_0)干旱胁迫下均比 CK 有不同程度的增加,且胁迫越重增加幅度越大,不耐旱品种增幅在两种干旱胁迫下均达到显著水平,耐旱品种在重度胁迫下也达到显著水平($P<0.05$);在相同程度胁迫下,耐旱品种 F_0 增幅小于不耐旱品种(表 3);同时,干旱胁迫使各品种苦荞 F_m 、 F_v/F_m 显著降低,胁迫程度越重降幅越大,且不耐旱品种降幅大于耐旱品种。说明干旱胁迫对各品种光合系统 II (PS II) 反应中心均造成不同程度破坏,但耐旱品种反应中心受破坏程度较小,抗旱能力更强。

2.3 干旱胁迫对苦荞幼苗根系生理指标的影响

2.3.1 根系活力 干旱胁迫使各品种苦荞苗期根系活力显著下降,且随着胁迫程度的增大下降更明显,而耐旱品种的根系活力降幅又小于不耐旱品种

(表 4)。其中,与 CK 处理相比,耐旱品种根系活力在 2 个干旱胁迫 (MS 和 SS) 下平均降幅是 22.50%,而不耐旱品种则平均降低 26%。可见,耐旱苦荞品种根系活力明显高于不耐旱品种,对干旱的耐性更强,吸收能力更好。

2.3.2 抗氧化酶活性及 MDA 含量 SOD 和 POD 均为植物细胞脂膜过氧化作用中氧自由基,是消除作物因逆境产生的 $O_2^{\cdot -}$ 和 H_2O_2 的关键酶^[25];MDA 是植物细胞膜脂过氧化作用产物,反映植物在逆境环境下所受伤害程度。由表 4 可知,在干旱胁迫条件下,各品种苦荞苗期根系 SOD、POD 活性均不同程度升高,且两个耐旱品种升高幅度均大于两个不耐旱品种。其中,在 MS、SS 干旱胁迫下,耐旱品种根系平均 SOD 活性分别为正常水分(CK)的 1.80 和 2.01 倍,而不耐旱品种分别为 1.45 和 1.46 倍;耐旱品种根系平均 POD 活性分别为正常水分的 1.24 和 1.23 倍,而不耐旱品种分别为 1.1 和 1.09 倍。同时,干旱胁迫也使各品种苦荞苗期根系 MDA 含量均显著升高,且不耐旱品种增幅均大于耐旱品种,重度胁迫大于中度胁迫。其中,在 MS、SS 两种干旱环境下,根系 MDA 含量增幅最大的品种分别是‘黑丰 1 号’(22.62%)和‘西荞 1 号’(56.18%),最小的品种为‘西农 9909’(分别为12.29%和19.70%)。可见,耐旱品种根系在干旱环境中可维持较高的 SOD、POD 活性,清除活性氧的能力更强,丙二醛的积累量更低,干旱耐受性更好。

表 3 水分胁迫对苦荞苗期叶片叶绿素含量、叶片相对含水量、荧光参数的影响

Table 3 Effect of water stress on chlorophyll content, leaf relative water content and fluorescence parameters of <i>F. tataricum</i> at seedling stage						
品种 Cultivar	处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content/(mg · g ⁻¹)	叶片相对含水量 Leaf relative water content/%	荧光参数 Fluorescence parameter		
				F_0	F_m	F_v/F_m
迪庆苦荞 DQ	CK	1.86±0.11aA	0.99±0.02aA	450.67±11.85bB	2 950.00±84.60aA	0.96±0.005aA
	MS	1.65±0.10bA	0.93±0.05aA	482.67±24.55bB	2 567.34±35.45bA	0.85±0.029bA
	SS	1.40±0.07cA	0.78±0.03bA	590.67±16.63aB	2 051.00±15.53cA	0.70±0.004cA
西农 9909 XN9909	CK	1.81±0.06aA	0.97±0.03aA	469.00±33.87bAB	3 026.67±101.30aA	0.97±0.007aA
	MS	1.60±0.07bA	0.91±0.02bA	498.67±6.66bB	2 646.00±30.42bA	0.86±0.049bA
	SS	1.35±0.06cA	0.74±0.03cB	603.00±8.55aAB	2 031.67±125.23cA	0.71±0.006cA
西荞 1 号 XQ1	CK	1.04±0.08aB	0.75±0.03aC	509.00±34.78cA	2 483.00±23.82aB	0.73±0.004aB
	MS	0.67±0.04bB	0.61±0.04bB	566.34±7.03bA	2 099.34±63.11bB	0.63±0.009bB
	SS	0.52±0.04cB	0.53±0.01cD	642.34±34.01aA	1 587.67±81.59cB	0.51±0.010cB
黑丰 1 号 HF1	CK	0.96±0.03aB	0.83±0.01aB	500.67±10.07cAB	2 473.67±74.45aB	0.75±0.009aC
	MS	0.60±0.05bB	0.67±0.04bB	563.00±37.65bA	2 073.67±54.64bB	0.62±0.006bB
	SS	0.47±0.04cB	0.59±0.05cC	619.34±13.43aAB	1 610.30±160.02cB	0.50±0.009cB

2.3.3 渗透调节物质含量 植株在逆境胁迫下会通过累积渗透调节物质降低渗透势来适应环境,而可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸作为植物体内重要的渗透调节物质均可作为衡量植物抗旱性的指标。表 5 显示,干旱胁迫对各品种苦荞苗期根系可溶性糖、可溶性蛋白及游离脯氨酸含量均有不同程度影响,可溶性糖及游离脯氨酸含量显著升高,而可溶性蛋白含量显著降低。其中,在中度和重度干旱胁迫下,根系可溶性蛋白含量降幅最大的品种均是

‘西荞 1 号’,降幅分别达 16%和 26%,随后依次是品种‘黑丰 1 号’、‘西农 9909’和‘迪庆苦荞’,两个耐旱品种降幅显著小于两个不耐旱品种;在两个干旱胁迫下,耐旱品种的平均可溶性糖含量和游离脯氨酸含量分别较 CK 处理显著提高 71%和 86%,而不耐低旱品种分别显著提高 21%和 42%,耐旱品种的增幅均明显高于不耐旱品种。由此表明,在干旱胁迫环境下,耐旱苦荞品种能够比不耐旱品种保持更强的渗透调节能力,表现出更好的适应性。

表 4 干旱胁迫对不同苦荞苗期根系活力、SOD 和 POD 活性及 MDA 含量的影响

Table 4 Effect of water stress on root activity, SOD activity, POD activity and MDA content of *F. tataricum* at seedling stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根系活力 Root activity /(mg · g ⁻¹)	超氧化物歧化酶 SOD activity /(U · g ⁻¹)	过氧化物酶活性 POD activity /(U · g · min ⁻¹)	丙二醛含量 MDA content /(nmol · g ⁻¹)
迪庆苦荞 DQ	CK	0.61±0.04aA	233.86±13.71cA	29.37±1.89bB	14.08±0.29cA
	MS	0.52±0.05bA	335.06±11.93bA	32.11±1.87bB	15.88±0.37bA
	SS	0.43±0.05cA	508.42±41.10aA	40.39±2.41aB	17.01±0.45aA
西农 9909 XN9909	CK	0.61±0.10aA	106.34±6.46cC	35.39±1.76bA	14.16±0.68bA
	MS	0.53±0.05bA	177.81±14.44bC	38.52±2.09bA	15.90±0.56aA
	SS	0.43±0.10cA	247.30±23.76aC	48.55±6.22aA	16.95±0.74aA
西荞 1 号 XQ1	CK	0.45±0.02aB	112.56±10.16bC	22.52±1.09bC	5.18±0.46cB
	MS	0.38±0.04bB	142.93±21.74fabD	24.26±1.35abC	6.27±0.69bB
	SS	0.28±0.03cB	183.16±43.63aC	24.94±0.73aC	8.09±0.12aB
黑丰 1 号 HF1	CK	0.48±0.01aB	202.74±18.42bB	24.87±1.68aC	5.35±0.65bB
	MS	0.41±0.02bB	274.28±21.12aB	26.35±1.59aC	6.56±0.87bB
	SS	0.32±0.020cB	319.97±31.30aB	27.79±2.34aC	8.30±0.97aB

表 5 干旱胁迫对不同苦荞脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

Table 5 Effect of water stress on soluble sugar content, soluble protein content and proline content of *F. tataricum* at seedling stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	可溶性糖含量 Soluble sugar content /(mg · g ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content /(mg · g ⁻¹)	游离脯氨酸含量 Free proline content /(μg · g ⁻¹)
迪庆苦荞 DQ	CK	1.28±0.06cA	6.47±0.28aA	31.58±0.60cA
	MS	2.00±0.08bA	5.9±0.59abA	46.23±0.17bA
	SS	2.27±0.06aA	5.22±0.05bA	68.99±0.47aA
西农 9909 XN9909	CK	1.14±0.03cA	6.49±0.81aA	29.74±0.91cB
	MS	1.81±0.02cB	5.68±0.26abA	46.89±0.40bC
	SS	2.18±0.10aA	5.17±0.42cA	66.08±0.40aB
西荞 1 号 XQ1	CK	1.14±0.06cB	4.78±0.37aB	14.99±0.09cD
	MS	1.35±0.07bC	4.04±0.37bB	18.74±0.48bC
	SS	1.47±0.05aB	3.52±0.05bB	23.21±0.78aC
黑丰 1 号 HF1	CK	1.02±0.07bC	4.63±0.13aB	21.99±0.88cC
	MS	1.16±0.05aD	3.76±0.82bcB	28.03±0.74bB
	SS	1.25±0.05aC	3.35±0.15cB	35.89±0.80aD

表 6 各基因型苦荞的综合指标值、权重、*D* 值及综合评价
Table 6 Principle component values and comprehensive indexes of low-N tolerance of different *F. tataricum* cultivars

品种 Cultivar	F1	F2	<i>D</i> 值 <i>D</i> value	排序 Sequence
迪庆苦荞 DQ	4. 068	−0. 476	2. 955	1
西农 9909 XN9909	2. 584	2. 966	2. 678	2
西荞 1 号 XQ1	−3. 571	−0. 070	−2. 713	4
黑丰 1 号 HF1	−3. 114	0. 047	−2. 340	3
权重 <i>W_j</i>	0. 755	0. 245		

2.4 各苦荞品种的综合指标值、权重、*D* 值、综合评价及其与相关性

由抗旱性综合评价公式(1)、(2)、(3)、(4)、(5) 可得出表 6 相关指标值,其中‘迪庆苦荞’的综合评价价值(*D* 值)最高,耐旱能力最强,其它品种由强到弱依次为‘西农 9909’、‘黑丰 1 号’和‘西荞 1 号’,这与上述各品种相关生长、生理生化指标分析所得结论基本一致。

另外,进一步把 21 个单一指标与综合评价值(*D* 值)做相关分析(表 7)表明,苦荞苗期株高、地下部干重以及根系 SOD 活性和蛋白质含量与 *D* 值呈显著正相关,根系脯氨酸含量和可溶性糖含量与 *D* 值呈极显著正相关。说明这 6 个指标对苦荞品种苗期抗旱性能力强弱的表达较为敏感,在苦荞苗期抗旱性测定工作中可有选择性地测定上述指标,使鉴定工作简化。

3 讨 论

3.1 不同抗旱性苦荞幼苗对干旱胁迫的形态响应

水是植物发生的最初环境,也是植物生长发育的必要条件。前人的研究表明,水分胁迫会影响形态指标,影响明显或降低最多的品种往往抗逆性最差^[26-27]。本研究表明,干旱胁迫对苦荞幼苗地上部的影响明显大于对根系的影响,并且在一定程度上干旱胁迫可促进其根系增长,且耐旱性最好品种的根冠比在一定程度上有所升高这是苦荞形态指标对干旱胁迫的一种响应机制;不同耐旱性苦荞品种对干旱胁迫的响应存在较大差异,耐旱品种受干旱胁迫的影响较小,其地上部农艺性状较不耐旱品种表现出明显优势,对干旱环境适应性更强。

干旱胁迫下苗期根系形态直接与水分含量的多少相关,较好的根系形态是植物水分吸收的重要前提。本研究得出,耐旱型苦荞在干旱环境中主根生长得到促进,适应性较好,说明干旱环境下耐旱品种

表 7 苦荞幼苗单一指标与综合评价价值(*D* 值)的相关系数
Table 7 Correlation coefficients between 21 single indicators and comprehensive value(*D*) of *F. tataricum* at seedling stage

指标 Indicator	相关系数 Correlation coefficient	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
株高 Plant height	0. 985 *	0. 150
茎粗 Stem diameter	0. 821	0. 179
叶面积 Leaf area	0. 913	0. 087
主根长 Main root length	0. 667	0. 333
根体积 Root volume	0. 666	0. 334
根表面积 Root area	0. 685	0. 315
茎叶干重 Shoot dry weight	0. 981	0. 019
根系干重 Root dry weight	0. 791 *	0. 209
根冠比 Root-shoot ratio	0. 716	0. 284
叶片相对含水量 Leaf relative water	0. 900	0. 100
叶绿素含量 Chlorophyll content	0. 696	0. 304
初始荧光 <i>F₀</i>	0. 651	0. 349
最大荧光 <i>F_m</i>	0. 765	0. 235
最大光化学效率 <i>F_v/F_m</i>	0. 728	0. 272
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0. 957 *	0. 043
过氧化物酶活性 POD activity	0. 890	0. 110
根系活力 Root activity	0. 847	0. 153
丙二醛含量 MDA content	0. 941	0. 059
游离脯氨酸含量 Free proline content	0. 999 **	0. 001
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0. 957 *	0. 043
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0. 994 **	0. 006

注: * 和 ** 分别表示相关性达到 0. 05 和 0. 01 显著水平
Note: * and ** indicate significant correlation at 0. 05 and 0. 01 level, respectively

植株通过增大根系与土壤的接触面积来获取水分和养分,这与张永清等^[28]对几种谷类作物根土系统的研究结果相似。此外,两个耐旱苦荞品种根系体积和根系表面积等指标受干旱环境影响程度低于不耐旱品种,由此表明耐旱品种在干旱环境中可保持较完整的根系形态来适应缺水环境。

3.2 不同抗旱性苦荞幼苗对干旱胁迫的生理响应

胁迫环境可导致植株形态学参数和生理生化指标发生改变^[29]。首先,从叶片来看,本次研究发现,耐旱苦荞品种幼苗叶片叶绿素含量、相对含水量、*F_m* 及 *F_v/F_m* 在干旱胁迫下降幅度均小于不耐旱品种,且其 *F₀* 有所升高,说明耐旱品种在干旱环境中叶绿素含量及捕获激发能的效率相对较高,PSⅡ反应中心受破坏程度较小,光合能力较强,适应性较好。其次,从根系来看,本研究表明干旱胁迫下苦荞苗期根系活力、可溶性蛋白质含量显著下降,根系

SOD 和 POD 活性以及 MDA、可溶性糖及游离脯氨酸含量显著升高,且不同耐旱性品种对干旱胁迫的响应存在明显差异。在干旱胁迫环境中,耐旱品种的根系 SOD、POD 活性增幅较大,能够较大幅度地解除或减缓毒性 O^- 和 H_2O_2 作用对植株造成的氧化伤害,降低细胞膜受伤程度,增强抗性;同时,其根系可溶性糖、游离脯氨酸等有机物质含量的增幅也较大,可大幅度提高根系的渗透调节能力,降低渗透势,并起到延缓植株衰老的作用。由此可知,干旱逆境下耐旱品种提高保护酶的能力较强,可快速清除有害成分,缓减膜脂过氧化作用,从而降低 MDA 含量,可更好地适应干旱环境,这是其耐旱胁迫的重要生理机制之一;而耐旱苦荞品种在旱胁迫下仍具有较高的根系活力及蛋白质含量也保证了其在干旱环境表现出较强的生存能力。

3.3 不同抗旱性苦荞的综合指标值及其与权重的相关性

作物的抗旱性是由多因素、多机制共同作用的复杂综合性状,不同作物的抗旱机制存在着差异^[30],用单一指标很难全面、精准地反映各品种的耐旱性强弱,所以,用多个指标去综合评价作物的耐旱性才比较可靠。本试验通过隶属函数法计算出苦荞幼苗各指标的耐旱系数 $[\mu(x_i)]$ 并将其作为评价苦荞单项耐旱能力大小的指标,并采用主成分分析法得出各苦荞品种综合抗旱能力(D 值),将参试的 4 个品种进行耐旱性排序。 $\mu(x_i)$ 为隶属函数法处理后的抗旱系数,将其作为抗旱性筛选指标能够消

除不同基因型苦荞间固有的生物学和遗传学特性差异; D 值是一个无量纲的纯数,所以各品种间的抗旱性差异具可比性。再通过对 D 值与各指标之间的关系相关性分析,筛选出对苦荞耐旱性影响较为显著的指标,进一步得到快速鉴别苦荞耐旱能力的指标。本研究结果表明:4 个苦荞品种根据 D 值的排序为‘迪庆苦荞’> ‘西农 9909’> ‘黑丰 1 号’> ‘西荞 1 号’,与之前单一指标分析的结果基本一致。同时通过相关性分析发现,苦荞幼苗株高、地下部干重以及根系 SOD 活性和可溶性蛋白含量与 D 值呈显著正相关,根系脯氨酸含量和可溶性糖含量与 D 值呈极显著正相关,说明这 6 个指标在苦荞对干旱逆境的感受最为敏感,可作为苦荞苗期快速、准确的抗旱性鉴定指标。此外,作物抗旱能力不仅与抗旱生理生化指标有关,还与干旱胁迫发生的时期有密切关系。本研究只对苦荞苗期形态、生理指标进行了综合性探讨,今后需考虑其他时期各指标对苦荞干旱的响应变化,从而得出更全面可靠的结论。

综上所述,干旱胁迫对苦荞苗期各指标均有显著影响,本研究在前期预实验结果的基础上,通过干旱胁迫处理和隶属函数法与主成分分析进一步确定出 4 个参试品种的耐旱等级差异,其从强到弱依次为‘迪庆苦荞’、‘西农 9909’、‘黑丰 1 号’和‘西荞 1 号’;同时,苗期株高、地下部干重以及根系 SOD 活性、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量这 6 个指标对干旱胁迫反应较敏感,可作为苦荞苗期抗旱性的快速鉴定指标。

参考文献:

- [1] 张 雄. 黄土高原小杂粮生产可持续发展研究[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学 2003: 20-30.
- [2] 万 燕, 韦 爽, 贾晓凤, 等. 荞麦抗旱性研究进展[J]. 作物杂志, 2015, (2): 23-26.
WAN Y, WEI S, JIA X F, *et al.* Advances in drought resistance of buckwheat[J]. *Crops*, 2015, (2): 23-26.
- [3] ZHOU X, HAO T, ZHOU Y L. Relationships between antioxidant compounds and antioxidant activities of tartary buckwheat during germination[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, **52**(4): 2 458-2 463.
- [4] HUANG X Y, ZELLER F J, HUANG K F. Variation of major minerals and trace elements in seeds of tartary buckwheat [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2014, **61**(3): 567-577.
- [5] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性——抗逆性的一般概念和植物的抗涝性[J]. 植物生理学通讯, 1983, (3): 24-29.
TANG Z C. The reaction and adaptability of plants to water stress [J]. *Plant Physiology Communications*, 1983, (3): 24-29.
- [6] 李 鑫, 张永清, 王大勇, 等. 水氮耦合对红小豆根系生理生态及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(12): 1 511-1 519.
LI X, ZHANG Y Q, WANG D Y, *et al.* Effects of coupling water and nitrogen on root physio-ecological indices and yield of adzuki bean [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(12): 1 511-1 519.
- [7] 张永清, 苗果园. 水分胁迫条件下有机肥对小麦根苗生长的影响[J]. 作物学报, 2006, **32**(6): 811-816.
ZHANG Y Q, MIAO G Y. Effects of manure on root and shoot growth of winter wheat under water stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, **32**(6): 811-816.
- [8] 徐笑宇, 方正武, 杨 璞, 等. 苦荞遗传多样性分析与核心种质筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2015, **1**(33): 268-277.
XU X Y, FANG Z W, YANG P, *et al.* Genetic diversity analysis of tartary buckwheat and selection of core collections[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, **1**(33): 268-277.
- [9] 汪 灿, 胡 丹, 杨 浩, 等. 苦荞主要农艺性状与产量关系的多重分析[J]. 作物杂志, 2013, **6**(11): 18-22.

WANG C, HU D, YANG H, *et al.* Genetic diversity of 104 tartary buckwheat accessions[J]. *Crops*, 2013, **6**(11): 18-22.

[10] 李瑞国, 高冬丽, 柴 岩, 等. 苦荞资源农艺性状因子聚类分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, **25**(6): 80-84.

LI R G, GAO D L, CHAI Y, *et al.* Factor and cluster analysis of tartary buckwheat resources[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, **25**(6): 80-84.

[11] 刘 琴, 张薇娜, 朱媛媛, 等. 不同产地苦荞籽粒中多酚的组成、分布及抗氧化性比较[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(14): 2 840-2 852.

LIU Q, ZHANG W N, ZHU Y Y, *et al.* Comparison of the constitutions, distribution, and antioxidant activities of polyphenols from different varieties of tartary buckwheat seed produced from different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(14): 2 840-2 852.

[12] QIN P Y, WANG Q, SHAN F, *et al.* Nutritional composition and flavonoids content of flour from different buckwheat cultivars[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, **45**(5): 951-958.

[13] 葛维德, 赵 阳, 刘冠求. 播种期对苦荞主要农艺性状及产量的影响[J]. 杂粮作物, 2009, **29**(1): 36-37.

GE W D, ZHAO Y, LIU G Q. Effects of sowing time on main agronomic characters and yield of tartary buckwheat [J]. *Rain Fed Crops*, 2009, **29**(1): 36-37.

[14] 万丽英. 播种密度对高海拔地区苦荞产量与品质的影响[J]. 作物研究, 2008, **22**(1): 42-44.

WAN L Y. Effect of planting density on yield and quality of tartary buckwheat in high altitude region[J]. *Crop Research*, 2008, **22**(1): 42-44.

[15] 田秀英, 李会合, 王正银. 施硒对苦荞 N, P, K 营养元素和土壤有效养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(3): 112-115.

TIAN X Y, LI H H, WANG Z Y. Effect of Se application on contents of nitrogen, phosphorus and potassium in tartary buckwheat and content of available nutrients in soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(3): 112-115.

[16] 宋毓雪, 郭 肖, 等. 不同氮磷钾肥料处理对苦荞籽粒充实度及产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, **26**(6): 1 568-1 572.

SONG Y X, GUO X, *et al.* Effects of different N,P,K treatments on the yield and plumpness of tartary buckwheat[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, **26**(6): 1 568-1 572.

[17] 张 强, 李艳琴. 基于矿质元素的苦荞产地判别研究[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(22): 4 653-4 659.

ZHANG Q, LI Y Q. The origin discrimination of tartary buckwheat based on the mineral elements[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(22): 4 653-4 659.

[18] LIM J H, PARK K J, *et al.* Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout[J]. *Food Chemistry*, 2012, **135**(3): 1 065.

[19] 胡丽雪. 苦荞幼苗对铅铝胁迫的生理生化反应及其矫治[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.

[20] 董新逆, 赵世杰, 郭珊珊, 等. 增强 UV-B 条件下类黄酮与苦荞逆境伤害和抗氧化酶的关系[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, **37**(2): 157-162.

DONG X C, ZHAO S J, GUO S S, *et al.* Role of flavonoids on stress in jury and antioxyd ative enzymes in *Fagopyrum tataricum* seedlings under enhanced UV-B radiation [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural-Science)*, 2006, **37**(2): 157-162.

[21] 陈 鹏, 张德玖, 李玉红, 等. 水分胁迫对苦荞幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北农业学报, 2008, **17**(5): 204-207.

CHEN P, ZHANG D J, LI Y H, *et al.* Effect of drought stress during seedling stage on physiological and biochemical traits of tartary buckwheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, **17**(5): 204-207.

[22] YAO Y, XUAN Z, LI Y, *et al.* Effects of ultraviolet-b radiation on crop growth, development, yield and leaf pigment concentration of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) under field conditions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, **25**(3): 215-222.

[23] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导(第 4 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 32-227.

[24] 许自成, 黎妍妍, 毕庆文, 等. 湖北烟区烤烟气候适生性评价及与国外烟区的相似性分析[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3 832-3 838.

XU Z C, LI Y Y, BI Q W, *et al.* Evaluation on climatic feasibility of tobacco-growing areas in Hubei and its similarity to that of foreign tobacco-growing areas [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(8): 3 832-3 838.

[25] 闫江艳, 张永清, 冯晓敏, 等. 干旱胁迫及复水对不同黍稷品种根系生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(2): 348-354.

YAN J Y, ZHANG Y Q, FENG X M, *et al.* Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of roots in different proso millet varieties[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(2): 348-354.

[26] 郑盛华, 严昌荣. 水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1 138-1 143.

ZHENG S H, YAN C R. The ecophysiological and morphological characteristics of maize in seeding stage under water stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(4): 1 138-1 143.

[27] 王贺正, 李 艳, 马 均, 等. 水稻苗期抗旱性指标的筛选[J]. 作物学报, 2007, **33**(9): 1 523-1 529.

WANG H Z, LI Y, MA J, *et al.* Screening indexes of drought resistance during seedling stage in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, **33**(9): 1 523-1 529.

[28] 张永清. 几种谷类作物根土系统的研究[D]. 山西太谷: 山西农业大学, 2005.

[29] 张美俊, 乔治军, 等. 不同糜子品种对低氮胁迫的生物学响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(3): 661-669.

ZHANG M J, QIAO Z J, *et al.* Biological response of different cultivars of millet to low nitrogen stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(3): 661-669.

[30] 邵惠芳, 陈 征, 等. 两种烟草幼苗叶片对不同强度干旱胁迫的生理响应比较[J]. 植物生理学报, 2016, **52**(12): 1 861-1 871.

SHAO H F, CHEN Z, *et al.* Physiological responses of two tobacco cultivar leaves to different drought stresses during seedling stage[J]. *Plant Physiol J*, 2016, **52**(12): 1 861-1 871.

(编辑: 裴阿卫)