

# 不同红小豆品种幼苗对干旱胁迫的生理响应

罗海婧<sup>1</sup>, 张永清<sup>1,2\*</sup>, 石艳华<sup>1</sup>, 李鑫<sup>1</sup>, 张耀文<sup>3</sup>

(1. 山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041004; 2. 山西师范大学城市与环境科学学院, 山西临汾 041004;

3. 山西省农业科学院小杂粮研究中心, 山西太原 030031)

**摘要:** 为筛选红小豆(*Phaseolus angularis* Linn.)幼苗抗旱性鉴定指标, 采用盆栽控水方法, 对红小豆3个品种‘保红947’、‘东北大红袍’、‘晋小豆5号’进行了苗期形态特征及根系生理生化特性的研究。结果表明: 干旱胁迫抑制了红小豆3个品种植株的生长; 重度干旱胁迫下, 3个品种光系统Ⅱ(PSⅡ)的潜在活性(可变荧光/初始荧光,  $F_v/F_0$ )、最大光化学效率(可变荧光/最大荧光产量,  $F_v/F_m$ )、株高、叶面积、茎粗、根鲜重、根系活力、可溶性蛋白质含量等指标均随干旱胁迫强度的增加呈明显下降趋势, 根冠比、根系脯氨酸(Pro)含量、可溶性糖含量、SOD活性、POD活性、MDA含量等指标随着干旱胁迫强度的增加呈明显上升趋势。综合各项生理指标, ‘东北大红袍’在干旱胁迫下能保持相对较优的生理状态, 抗旱性最强。通过主成分分析表明, 株高、叶面积、茎粗、主根长、根鲜重、最大光化学效率、根系活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、SOD活性、MDA含量等生理生化特性可作为鉴定红小豆苗期抗旱性的指标。

**关键词:** 红小豆; 干旱胁迫; 苗期; 生理特性

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2014)05-0493-09

## Effects of Drought Stress on the Physiological Characteristics of Different Adzuki Bean Varieties at the Seedling Stage

LUO Hai-Jing<sup>1</sup>, ZHANG Yong-Qing<sup>1,2\*</sup>, SHI Yan-Hua<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, ZHANG Yao-Wen<sup>3</sup>

(1. College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China; 3. Minor Staple Crop Research Laboratory Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

**Abstract:** The aim of this study was to select the index of drought resistance in adzuki bean breeding. The effects of three different drought stresses on the physiomorphological characteristics and root associated physiological characteristics of the adzuki bean (‘Baohong 947’, ‘Dongbeidahongpao’, and ‘Jinxiadou 5’) during the seedling stage were studied in a pot experiment. Results showed that drought stress inhibited plant growth, with all indexes showing a certain regularity with increasing drought stress. Compared with the control, the indexes of the three adzuki bean varieties, especially that under severe drought stress, changed effectively. The potential activity of PSⅡ (variable fluorescence/minimal fluorescence,  $F_v/F_0$ ), maximal photochemical efficiency (variable fluorescence/maximal fluorescence,  $F_v/F_m$ ), plant height, leaf area, stem diameter, root fresh weight, root activity, and content of soluble protein all decreased, respectively. However, with the decrease in water, the root-shoot ratio, content of proline (Pro), content of soluble sugar, activity of SOD, activity of POD and content of MDA increased, respectively. In short, ‘Dongbeidahongpao’ maintained a

收稿日期: 2014-02-24, 退修日期: 2014-04-30。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(30871483); 山西省自然科学基金项目(2013011030-1)。

作者简介: 罗海婧(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物生理生态学(E-mail: luohaijing2005@163.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: yqzhang208@163.com)。

relatively superior physiological state under drought stress, exhibiting higher drought resistance than the other two varieties. By principal component analysis, the plant height, leaf area, stem diameter, main root length, root fresh weight, maximal photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ), root activity, content of soluble sugar, content of soluble protein, activity of SOD, and content of MDA can be used as indexes for identifying drought resistance of the adzuki bean.

**Key words:** Adzuki bean; Drought stress; Seedling stage; Physiological characteristics

干旱胁迫对农作物形态和生理的影响是目前的研究热点。根系是作物感受土壤干旱的原初部位与敏感部位，其数量多少、分布和生理状况等直接关系着作物抗旱性的强弱，因而研究作物根系对干旱胁迫的生理生态反应更有利于揭示抗旱的本质，对旱地农业生产也更有实践意义<sup>[1]</sup>。前人以小麦<sup>[2]</sup>、玉米<sup>[3]</sup>、大豆<sup>[4]</sup>等作物为研究材料，探明了一些适应干旱的形态生理指标。然而，有关干旱对作物根系生理影响方面的研究尚属薄弱环节，尤其是关于杂粮作物根系对干旱胁迫响应方面的研究更少。

红小豆(*Phaseolus angularis* Linn.)，又名小豆、赤豆，是传统的粮食作物，富含多种维生素，适应性强，营养价值高<sup>[5]</sup>，常作为一种填闲作物或被种植在无法灌溉或灌溉得不到保障的旱地，因此研究其对干旱的适应性机制有着重要的理论及实践意义。目前有关红小豆的研究主要集中于栽培、种质资源、营养价值、活性成分及制备工艺等方面<sup>[5-8]</sup>，也初步探讨了红小豆叶片光合特性<sup>[9]</sup>，铜胁迫对红小豆萌发的影响<sup>[10]</sup>，但关于红小豆在干旱胁迫下生理响应的研究还未见报道。本研究采用盆栽控水实验方法，研究不同干旱条件下红小豆品种苗期叶绿素荧光参数以及根系的形态特性、丙二醛含量、渗透调节物质含量、保护酶活性等生理指标的变化规律，旨在通过比较不同品种间变化幅度的差异水平，揭示红小豆不同品种幼苗在干旱胁迫下的生理适应特性，为红小豆抗旱品种的选育及抗旱机制等方面的研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

供试材料为红小豆(*Phaseolus angularis* Linn.)3个品种‘保红947’、‘东北大红袍’和‘晋小豆5号’种子，均由山西省农业科学院作物所提供。

实验土壤为黄土母质上发育而成的石灰性褐土，其基础肥力为：有机质12 g/kg、全氮1.05 g/kg、速效钾92.04 mg/kg、速效磷15 mg/kg，土壤pH 8.4。

### 1.2 实验设计

实验于2013年6月在山西师范大学校内塑料防雨棚内进行。盆栽容器为塑料盆(底部直径14 cm、上部直径18.5 cm、高20.5 cm)，每盆装风干土3 kg，为了保证实验期间幼苗的生长不受养分限制，每公斤土壤分别施N 0.3 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.2 g、K<sub>2</sub>O 0.3 g作为底肥，所用肥料分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15%)和氯化钾(含K<sub>2</sub>O 52%)。选取子粒饱满、无病虫的红小豆种子，每盆播种15粒，所有实验用盆等量浇水以保证种子顺利出苗。在红小豆单叶完全展开之后，每盆留7株，并于三叶期选取长势一致的植株进行干旱实验，每个品种设正常供水(CK)、中度干旱(MS)和重度干旱(SS)3个处理，其土壤相对含水量分别为田间土壤最大持水量(30.77%)的70%~80%、50%~55%和35%~40%。每个处理3次重复。每天16:00用称重法控水，补充失去的水分，使各处理保持设定的土壤含水量，处理期间除盆内土壤水分不同外，其它管理一致。土壤相对含水量达到干旱胁迫条件后持续10 d后开始取样。取样时先用水将盆土充分浸泡，将土壤连同植株轻轻倒出，然后用流水慢慢冲洗，洗净根系上所有附泥，迅速带回实验室，测定各项生理生化指标。

### 1.3 测定指标与方法

**形态指标的测定：**取第2片三出复叶，采用L-3000A叶面积仪测定叶面积，取平均值。株高、主茎粗、主根长，采用卷尺或游标卡尺直接测量。根鲜重和地上部鲜重，采用直接称量法。根冠比=根鲜重/地上部鲜重。

**叶绿素荧光参数的测定:**采用美国 Opti2science 公司生产的 OS52FL 调制式叶绿素荧光仪,于取样前一天(10:00~14:00,晴朗、无风)测定第2片三出复叶的叶绿素荧光参数(初始荧光  $F_0$ 、最大荧光产量  $F_m$ ),取平均值。

**根系生理生化指标的测定:**采用 TTC 法<sup>[11]</sup>测定根系活力、愈创木酚比色法测定 POD 活性、氮蓝四唑(NBT)法<sup>[11]</sup>测定 SOD 活性、硫代巴比妥酸法<sup>[11]</sup>测定丙二醛(MDA)含量、酸性茚三酮法<sup>[11]</sup>测定游离脯氨酸含量、蒽酮比色法<sup>[11]</sup>测定可溶性糖含量、考马斯亮蓝 G250 法<sup>[12]</sup>测定可溶性蛋白质含量。以上所有指标均为3次重复。

#### 1.4 红小豆品种抗旱性评价方法

测试性状的抗旱系数(drought resistance coefficient, DC):采用各测试指标相对值(抗旱系数)进行抗旱性评价。抗旱系数=(水分胁迫测定值/正常条件测定值)×100%。

各指标的主成分分析:根据品种的各测试指标抗旱系数,运用 SPSS 16.0 软件进行主成分分析。

#### 1.5 数据分析

所有数据采用 Excel 和 SPSS 16.0 软件进行统计分析,采用 Excel 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对红小豆不同品种幼苗形态指标的影响

#### 2.1.1 对地上部分植株生长的影响

与正常供水相比,各干旱胁迫处理下3个品种的株高、叶面积及茎粗均有所降低,同时随着干旱胁迫程度的增加降幅也增大(表1)。

从株高来看,同一品种不同处理间均达显著水平( $P < 0.05$ ),重度胁迫下各品种间株高达显著水平( $P < 0.05$ )。与对照相比,在中度和重度胁迫下,‘保红 947’株高分别下降了 8.89% 和 52.13%;‘东北大红袍’分别下降了 16.22% 和 20.05%;‘晋小豆 5 号’分别下降了 14.83% 和 30.39%。

从叶面积来看,中度和重度胁迫下,‘东北大红袍’降幅最小,分别下降了 2.25% 和 26.20%;‘晋小豆 5 号’降幅最大,分别下降了 14.83% 和

37.51%。‘保红 947’和‘东北大红袍’在中度胁迫下与对照相比差异均未达显著水平;重度胁迫下,各品种间叶面积差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

从茎粗来看,中度和重度胁迫下,‘东北大红袍’降幅最小,分别下降了 18.92% 和 21.62%;‘保红 947’降幅最大,分别下降了 34.04% 和 38.30%。3 个品种在 2 种胁迫处理下差异均未达显著水平,但与对照相比达显著水平。

#### 2.1.2 对根系生长的影响

干旱胁迫下根的伸长有利于作物从土壤中吸收水分<sup>[13]</sup>。由表 2 可知,在正常供水条件下,‘晋小豆 5 号’的主根分别比‘保红 947’和‘东北大红袍’长 18.63% 和 14.71%。中度胁迫下,‘晋小豆 5 号’主根的长度显著降低,是对照的 70.26%;而‘保红 947’和‘东北大红袍’的主根分别比对照增长了 5.10% 和 14.06%。重度胁迫下,3 个品种的主根长度与对照相比均下降,其中‘晋小豆 5 号’的降幅最大,为 37.48%,其次是‘保红 947’,为 16.91%,‘东北大红袍’降幅最小,为 13.79%。

苗期干旱胁迫使红小豆 3 个品种根系鲜重不同程度地降低,重度胁迫下降幅明显大于中度胁迫(表 2)。重度胁迫下,品种间根系鲜重达显著水平( $P < 0.05$ ),‘保红 947’、‘东北大红袍’和‘晋小豆 5 号’的根系鲜重分别为对照的 11.24%、19.06% 和 29.91%,可见‘晋小豆 5 号’降幅最小,‘保红 947’降幅最大,‘东北大红袍’介于两者之间。

随着干旱胁迫程度加大,3 个品种根冠比均不同程度上升,同一胁迫程度下,各品种间根冠比达显著水平( $P < 0.05$ ,表 2)。统计分析表明,重度胁迫下‘东北大红袍’增幅最大(11.25%),其次是‘保红 947’,增幅为 8.82%,‘晋小豆 5 号’增幅最小,仅增加了 5.08%。

### 2.2 干旱胁迫对红小豆不同品种幼苗叶绿素荧光参数的影响

无论是中度还是重度干旱胁迫,都使红小豆 3 个品种光系统 II(PS II)的潜在活性( $F_v/F_0$ )下降,且降幅随着受胁迫程度的加剧而加大(表 3)。中度胁迫下,‘晋小豆 5 号’降幅最大,比对照下降了 42.13%;‘保红 947’ $F_v/F_0$ 略低于对照,两者差

异不显著。重度胁迫下,‘东北大红袍’与中度胁迫相比差异不显著,而各品种与对照间差异均达显著水平( $P<0.05$ ),且各品种间也达显著水平( $P<0.05$ )。PSⅡ的潜在活性降幅表现为:‘东北大红袍’<‘保红947’<‘晋小豆5号’,表明干旱胁迫下‘东北大红袍’仍有较大的光化学潜在活性,抗旱性较强。

苗期干旱胁迫下,最大光化学效率( $Fv/Fm$ )也呈现下降趋势(表3)。中度胁迫下,各品种间

$Fv/Fm$ 差异达显著水平( $P<0.05$ ),其中‘晋小豆5号’降幅最大,比对照下降了21.43%;‘保红947’略低于对照,差异不显著。重度胁迫下,‘晋小豆5号’ $Fv/Fm$ 降幅仍为最大(27.14%),与中度胁迫间差异不显著;‘东北大红袍’降幅最小,仅下降了11.43%。这些结果表明,‘东北大红袍’在重度胁迫下仍具有较高的光合电子传递活性,其光合器官能把所捕获的光能较充分、较高效地转化为生物化学能,抗旱性高于‘保红947’和‘晋小豆5号’。

表1 苗期干旱胁迫对红小豆不同品种地上部分植株生长的影响

Table 1 Effects of drought stress on shoot growth of different adzuki bean varieties at the seedling stage

品种 Varieties	株高 Plant height (cm)			叶面积 Leaf area (cm <sup>2</sup> /株)			茎粗 Stem diameter (cm)		
	CK	MS	SS	CK	MS	SS	CK	MS	SS
‘保红947’	22.50 ± 0.31 aA	20.50 ± 0.25 bA	10.77 ± 0.09 cC	32.99 ± 0.66 aC	31.87 ± 0.30 aB	21.41 ± 0.11 bC	0.47 ± 0.02 aA	0.31 ± 0.00 bA	0.29 ± 0.01 bA
‘东北大红袍’	19.30 ± 0.21 aB	16.17 ± 0.03 bB	15.43 ± 0.23 cA	40.38 ± 0.47 aA	39.47 ± 0.08 aA	29.80 ± 0.14 bA	0.37 ± 0.01 aB	0.30 ± 0.00 bA	0.29 ± 0.01 bA
‘晋小豆5号’	18.00 ± 0.47 aC	15.33 ± 0.44 bB	12.53 ± 0.35 cB	36.76 ± 0.13 aB	31.31 ± 0.24 bB	22.97 ± 0.28 cB	0.38 ± 0.01 aB	0.30 ± 0.01 bA	0.29 ± 0.00 bA
‘Jinxiadou 5’									

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; 同列数据后不同小写字母表示同一品种不同处理间差异在5%水平上显著, 不同大写字母表示同一处理不同品种间差异在5%水平上显著。下同。

Notes: CK, Control; MS, Moderate drought stress; SS, Severe drought stress. Values are mean ± SE. Values within a column followed by a different lowercase letter are significantly different at the 5% level of probability for the same variety, values within a row followed by a different capital letter are significantly different at 5% level of probability among varieties. Same below.

表2 苗期干旱胁迫对红小豆不同品种根系生长的影响

Table 2 Effects of drought stress on root system in different adzuki bean varieties at the seedling stage

品种 Varieties	主根长 Main root length (cm)			根鲜重 FW of root (g/株)			根冠比 Root-Shoot ratio		
	CK	MS	SS	CK	MS	SS	CK	MS	SS
‘保红947’	24.90 ± 0.40 aA	26.17 ± 1.15 aAB	20.69 ± 0.37 bA	5.16 ± 0.35 aB	3.05 ± 0.15 bA	0.58 ± 0.02 cC	0.68 ± 0.01 cB	0.70 ± 0.01 bB	0.74 ± 0.01 aB
‘东北大红袍’	26.10 ± 2.07 abA	29.77 ± 2.73 aA	22.50 ± 0.31 bB	8.34 ± 0.48 aA	3.05 ± 0.29 bA	1.59 ± 0.01 cA	0.80 ± 0.01 cA	0.83 ± 0.01 bA	0.89 ± 0.01 aA
‘晋小豆5号’	30.60 ± 1.75 aB	21.50 ± 2.18 bB	19.13 ± 0.15 bB	4.68 ± 0.22 aB	1.88 ± 0.03 bB	1.40 ± 0.02 cB	0.59 ± 0.01 bC	0.60 ± 0.01 bC	0.62 ± 0.01 aC
‘Jinxiadou 5’									

表3 苗期干旱胁迫对红小豆不同品种叶绿素荧光参数的影响

Table 3 Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters of leaves of different adzuki bean varieties at the seedling stage

品种 Varieties	PSⅡ潜在活性 $Fv/Fo$			最大光化学效率 $Fv/Fm$		
	CK	MS	SS	CK	MS	SS
‘保红947’	2.26 ± 0.01 aA	2.21 ± 0.11 aA	1.26 ± 0.02 bB	0.72 ± 0.01 aA	0.69 ± 0.02 aA	0.55 ± 0.01 bB
‘东北大红袍’	2.32 ± 0.13 aA	1.69 ± 0.02 bB	1.50 ± 0.05 bA	0.70 ± 0.01 aA	0.66 ± 0.00 bB	0.62 ± 0.01 cA
‘晋小豆5号’	2.54 ± 0.05 aA	1.47 ± 0.01 bB	1.06 ± 0.04 cC	0.70 ± 0.00 aA	0.55 ± 0.00 bC	0.51 ± 0.02 bB
‘Jinxiadou 5’						

## 2.3 干旱胁迫对红小豆不同品种幼苗根系生理特性的影响

### 2.3.1 对根系活力的影响

根系活力可以反映根系生长发育状况。由图1可见, 红小豆3个品种根系活力随干旱胁迫程度加剧均呈下降趋势, 不同处理下根系活力差异显著( $P < 0.05$ ); 相同处理下, 各品种间根系活力差异显著( $P < 0.05$ )。正常水分条件下, 根系活力以‘晋小豆5号’最高, 比‘保红947’和‘东北大红袍’显著高出14.14%、27.31%。但在中度和重度胁迫下, 与对照相比, ‘晋小豆5号’根系活力的降幅最明显, 分别降低了34.83%和68.56%; ‘保红947’和‘东北大红袍’分别降低了11.41%、45.7%和13.66%、61.46%。此结果表明, ‘晋小豆5号’对干旱胁迫较敏感, 胁迫处理下根系活力较差, ‘保红947’和‘东北大红袍’对干旱胁迫的调节适应能力较强。

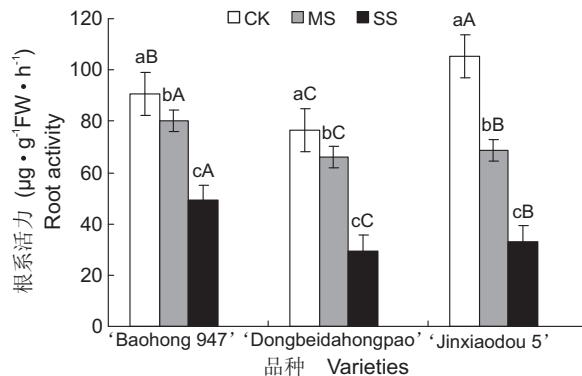


图1 苗期干旱胁迫对红小豆不同品种根系活力的影响  
Fig. 1 Effects of root activity of different adzuki bean varieties under drought stress at the seedling stage

### 2.3.2 对渗透调节物质的影响

渗透调节是植物在逆境条件下通过降低渗透势来抵抗逆境胁迫的一种重要机制。在干旱胁迫下, 一些在细胞内合成的有机溶质, 如脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质等可参与渗透调节, 维持细胞生长所需膨压, 保证各种代谢过程的顺利进行<sup>[3,14]</sup>。

从研究结果可以看出(图2: A), 红小豆根系脯氨酸含量随干旱胁迫程度的增强而明显增加( $P < 0.05$ ), 尤其是重度胁迫处理后, 脯氨酸含量急剧上升, 各品种间增加幅度不同。正常水分条件下, ‘晋小豆5’脯氨酸含量高于其它2个受试品

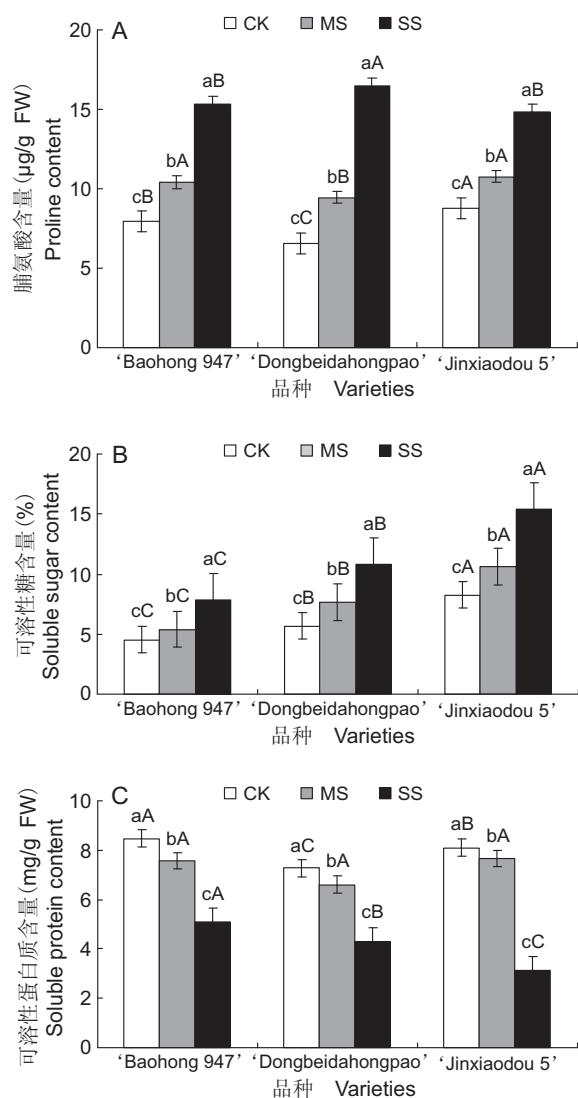
种。中度和重度胁迫处理下, ‘东北大红袍’增幅最明显, 分别比对照增加了45.09%和152.45%, ‘保红947’增加了30.98%和93.07%, ‘晋小豆5号’增加了22.81%和69.52%。表明‘东北大红袍’能够积累更多的脯氨酸来增强渗透调节能力, 抗旱性强于‘保红947’和‘晋小豆5号’。

随胁迫程度的增强, 可溶性糖含量也逐步增加, 重度胁迫与对照相比差异显著( $P < 0.05$ ); 同一胁迫处理下, 各品种间差异显著( $P < 0.05$ )。中度和重度胁迫下, ‘东北大红袍’增幅最大, 分别比对照增加了34.92%和90.65%, ‘保红947’增幅最小, 分别比对照增加了19.47%和73.95% (图2: B)。由此看出, ‘东北大红袍’具有较强的干旱适应能力。

可溶性蛋白质可调节植物细胞渗透势, 抵抗干旱胁迫带来的伤害。研究结果(图2: C)显示, 可溶性蛋白质含量随干旱胁迫的加剧呈下降趋势, 且重度胁迫下的降幅大于中度胁迫, 不同干旱处理间差异显著( $P < 0.05$ )。重度胁迫下, 各品种间差异达显著水平( $P < 0.05$ ), 其中‘晋小豆5号’的变化幅度最大, 下降至对照的38.47%; ‘保红947’和‘东北大红袍’, 下降幅度基本相同, 分别为60.21%和59.10%。说明在重度干旱胁迫下, ‘保红947’和‘东北大红袍’能维持相对较高的可溶性蛋白质含量, 维持细胞较低的渗透势以抵抗干旱胁迫带来的伤害, 抗旱性比‘晋小豆5号’强。

### 2.3.3 对根系保护酶(SOD、POD)活性和丙二醛(MDA)含量的影响

植物的抗旱性与体内保护酶系统对活性氧的清除能力直接相关, SOD和POD是植物体内防御ROS伤害的重要保护酶, 可清除植物体内具有潜在危害的O<sup>2-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 从而最大限度地减少·OH的形成<sup>[14,15]</sup>。红小豆3个品种苗期根系SOD与POD活性在不同程度的干旱胁迫下均有提高, 同一程度胁迫下, 各品种间POD活性差异达显著水平( $P < 0.05$ , 图3: A、B)。‘东北大红袍’SOD活性在中度、重度2个胁迫处理下提高幅度最大; 而POD活性, 中度胁迫下‘保红947’增幅较大, 比对照增加了24.09%, 重度胁迫下‘东北大红袍’增幅最大, 为对照的1.78倍。‘晋小豆5号’的SOD、

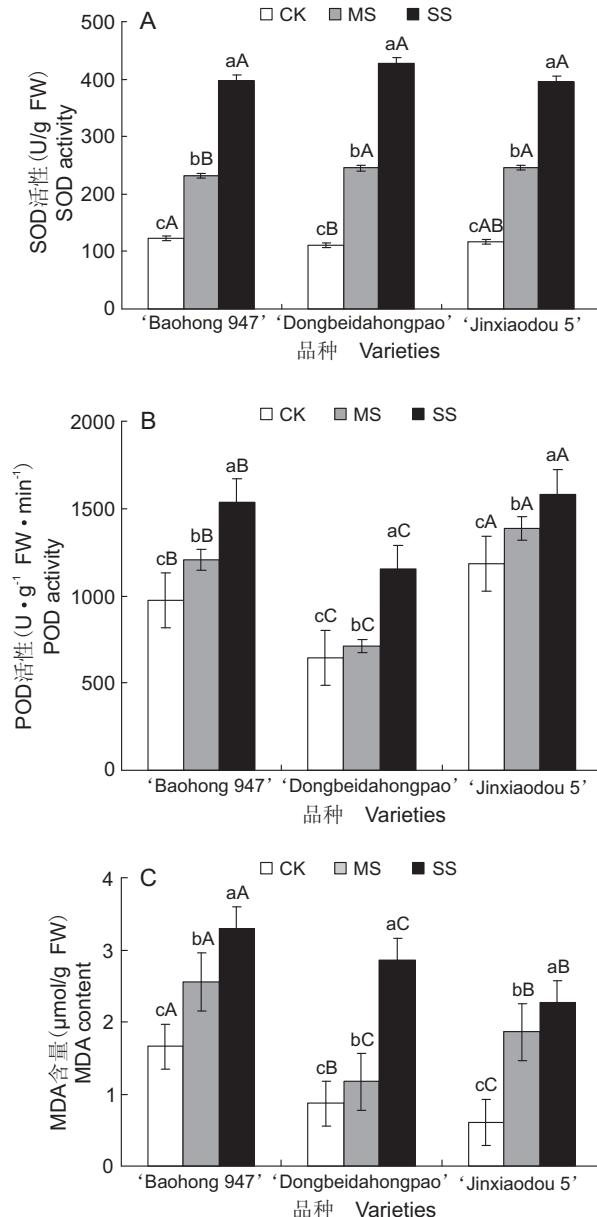


**图 2** 苗期干旱胁迫对红小豆不同品种根系脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质含量的影响  
Fig. 2 Changes in proline, soluble sugar and soluble protein content of different adzuki bean varieties under drought stress at the seedling stage

POD 活性在胁迫处理下的增幅均为最小 (1.10%、2.42% 和 16.89%、33.80%)。干旱胁迫下, SOD 活性的提高幅度大于 POD, 表明 SOD 对干旱胁迫反应更为敏感, 且 ‘东北大红袍’ 的抗旱能力高于其它 2 个品种。

丙二醛 (MDA) 是自由基进行细胞膜过氧化伤害的最终产物之一<sup>[16]</sup>。随着干旱胁迫程度的增加, 红小豆 3 个品种的 MDA 含量均呈上升趋势, 但升高幅度不同, 各品种间差异显著 ( $P < 0.05$ , 图 3:

C)。与对照相比, 中度和重度胁迫处理下, ‘东北大红袍’ 的增幅较小 (34.61%、161.91%), ‘晋小豆 5 号’ 增幅最明显 (207.76%、373.51%), ‘保红 947’ 介于两者之间 (54.84%、99.20%)。表明干旱胁迫下 ‘东北大红袍’ 的根系抗膜脂过氧化能力较强, 膜结构受破坏程度较小, 可保持较强的抗旱性。



**图 3** 苗期干旱胁迫对红小豆不同品种根系 SOD、POD 活性和 MDA 含量的影响  
Fig. 3 Effects of SOD, POD activity and MDA content of different adzuki bean varieties under drought stress at the seedling stage

## 2.4 抗旱相关性状的主成分分析

利用 SPSS 16.0 软件对 15 个测试指标抗旱系数进行主成分分析,结果显示(表 4),前 3 个综合指标贡献率分别为 58.97%、14.55%、13.93%,其累计贡献率达 87.44%,而其余综合指标的累计贡献率不足 13%。从而将 15 个单项指标转换为 3 个新的相互独立的综合指标,这 3 个主因子可以反映出 15 个抗旱性指标原始特征参数的大部分信息,根据贡献率的大小可知各综合指标的相对重要性,将这 3 个综合指标分别定义为第 1 至第 3 个主成分。

**表 4 主成分分析中的各综合指标载荷系数及其贡献率**  
Table 4 Factor coefficient of comprehensive indices and their proportion by principal components analysis

指标 Index	1	2	3
株高 Plant height	0.668	-0.385	0.551
叶面积 Leaf area	0.940	0.083	0.259
茎粗 Stem diameter	0.057	-0.607	0.449
主根长 Main root length	0.315	0.409	-0.705
根鲜重 FW of root	0.827	-0.228	0.141
根冠比 Root-Shoot ratio	-0.723	0.542	0.252
PSⅡ潜在活性 ( $Fv/Fo$ )	0.737	0.426	0.424
最大光化学效率 ( $Fv/Fm$ )	0.647	0.416	0.582
根系活力 Root activity	0.945	0.281	-0.042
脯氨酸 Proline content	-0.794	0.333	0.456
可溶性糖 Soluble sugar content	-0.949	0.051	0.123
可溶性蛋白质 Soluble protein content	0.900	0.068	0.051
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	-0.960	0.058	0.194
过氧化物酶活性 POD activity	-0.793	0.403	0.368
丙二醛含量 MDA content	-0.678	-0.654	0.130
贡献率 (%)	58.970	73.518	87.443

对 3 个主成分分析发现,第 1 主成分的叶面积、根鲜重、根系活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、SOD 活性因子载荷系数绝对值较大;第 2 主成分的茎粗、MDA 含量因子载荷系数绝对值较大;第 3 主成分的株高、主根长、最大光化学效率因子载荷系数绝对值也较大。因此,叶面积、根鲜重、根系活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、SOD 活性、茎粗、MDA 含、株高、主根长、最大光化学效率等指标与红小豆苗期抗旱性关联紧密。

## 3 讨论

有研究表明,不同土壤水分影响植株的形态结构,如茎的生长、叶面积、株高等对水分亏缺非常敏感,重度干旱胁迫会严重影响植株生长<sup>[3,17]</sup>。从本实验结果来看,干旱胁迫能抑制红小豆 3 个品种的生长,导致株高、叶面积、茎粗、根鲜重等随胁迫程度的加重而下降幅度增加;重度胁迫下,株高、叶面积、根鲜重、根冠比这几项指标在品种间差异达显著水平( $P < 0.05$ );‘东北大红袍’的株高、叶面积、茎粗等指标降幅最小。张永清等<sup>[13]</sup>的研究表明,在土壤水分亏缺时,作物主要依赖贮存在土壤深处的水分,使得根加速伸长以吸收到深层水分。本实验中度干旱胁迫下,‘保红 947’和‘东北大红袍’的根系长度呈先升高后降低的趋势,推测其根长迅速增加是为获取更多水分,而在重度胁迫下,根系的生长受到抑制,根系长度呈下降趋势。干旱胁迫使红小豆根冠比增大,并随胁迫程度的增强而加大,这与 Smucker 等<sup>[18]</sup>关于干旱胁迫下光合产物优先分配给根系、根冠比增大的结果一致。综合来看,‘东北大红袍’的各形态指标下降幅度相对小于‘保红 947’和‘晋小豆 5 号’,表现出较强的抗旱性。

植物体内叶绿素荧光参数与作物品种的抗旱性有密切关系,可作为鉴定品种抗旱性的相关指标<sup>[19]</sup>。本研究红小豆 3 个品种经干旱胁迫后,其  $Fv/Fm$  和  $Fv/Fo$  值均出现不同程度的降低,表明干旱胁迫影响了 PSⅡ捕获激发能的效率和光合作用的原初反应,造成 PSⅡ反应中心的部分失活和功能丧失,且随着胁迫程度的增大下降趋势更加明显。3 个品种的 PSⅡ潜在活性和最大光化学效率降幅不同,‘东北大红袍’降幅较小,表明其具有较好的抵御 PSⅡ破坏的能力,这与冯晓敏等<sup>[20]</sup>对干旱胁迫下不同糜子品种荧光参数的研究结果一致。

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官,在干旱胁迫下,保持较高的根系活力是作物抗旱性强的表现<sup>[21]</sup>,本研究结果也支持这一结论。干旱胁迫下红小豆 3 个品种间根系活力差异显著( $P < 0.05$ ),在中度和重度胁迫下,‘晋小豆 5 号’的根

系活力分别比对照降低了 34.82%、68.55%，下降幅度显著大于‘保红 947’和‘东北大红袍’，表明‘晋小豆 5 号’抵御干旱的能力低于其它 2 个品种。

作物在干旱胁迫下通过积累大量的渗透调节物质，从而保证组织水势下降的同时细胞膨压得以维持，进而保证生理代谢活动的正常进行<sup>[14]</sup>。有研究表明，植物在干旱胁迫下普遍出现游离脯氨酸和可溶性糖大量积累、蛋白质合成受阻的现象<sup>[22,23]</sup>。本实验结果显示，在相同干旱处理下，可溶性糖含量在各品种间差异显著( $P < 0.05$ )，重度胁迫下，可溶性蛋白质含量在各品种间也差异显著( $P < 0.05$ )。‘东北大红袍’的脯氨酸和可溶性糖含量增幅最大，可溶性蛋白质含量在干旱胁迫下逐步减少，但仍可维持较高水平，表明该品种在干旱胁迫下可累积大量的渗透调节物质，从而增强渗透调节能力，抗旱能力高于‘保红 947’和‘晋小豆 5 号’。与蔡昆争等<sup>[24]</sup>对水稻根部可溶性糖和脯氨酸含量受干旱胁迫的变化趋势一致。

干旱胁迫下，植物体内能产生大量的活性氧自由基，对植物造成伤害，膜系统是植物受环境胁迫最敏感的部位之一，当细胞的结构和功能受到胁迫伤害时，细胞膜膜内物质外渗，MDA 含量增加<sup>[17]</sup>。有研究表明，干旱胁迫下抗旱性强的品种丙二醛含量增加幅度较低，抗旱性弱的品种则增幅较高<sup>[3]</sup>。本研究红小豆 3 个品种在中度和重度胁迫处理下 MDA 含量差异显著( $P < 0.05$ )，‘晋小豆 5 号’的增幅最大，‘保红 947’和‘东北大红袍’的增幅较小，表明‘东北大红袍’和‘保红 947’的抗旱性大于‘晋小豆 5 号’。

随着干旱胁迫程度增强，植物体内的保护酶如 SOD、POD 等是活性氧的主要清除酶，可以免除或降低活性氧自由基对植物造成的伤害<sup>[15,22]</sup>。有研究表明，干旱初期耐旱品种水稻具更大幅度提高保护酶活性的能力，不耐旱品种酶活性提高较少<sup>[3]</sup>。本实验中红小豆 3 个品种在进行不同程度的干旱胁迫后，其根系 SOD、POD 活性均比对照增加，特别是重度胁迫下，‘东北大红袍’的 SOD、POD 活性的提高幅度最大，表明‘东北大红袍’在干旱胁迫下能更大幅度提高保护酶活性的能力，抗

旱性大于其它 2 个品种。本实验结果表明，SOD 对干旱胁迫的反应较为敏感，可作为抗旱性的鉴定指标。而孙昊等<sup>[22]</sup>研究发现，干旱胁迫对 SOD 活性有一定的抑制作用，POD 的活性持续升高，这可能是由于不同植物间保护酶系统变化不同，且植株受胁迫的时间、程度、取材部位等不同而有所差异。

本研究采用主成分分析将 15 个抗旱相关指标转化为 3 个彼此独立的综合指标，分析结果显示，叶面积、根鲜重、根系活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、SOD 活性、茎粗、MDA 含量、株高、主根长、最大光化学效率等指标可作为快速鉴定红小豆苗期抗旱性的指标，这将极大地降低抗旱鉴定工作量，缩短抗旱鉴定评价周期，提高抗旱种质资源发掘和品种抗旱性鉴定的效率。

红小豆的抗旱性是一个复杂的生物性状，其抗旱性与干旱胁迫发生的时期也有密切关系，故本研究结果及其适应干旱环境的机理，还有待在其它生育阶段进行深入研究和进一步验证。

## 4 结论

干旱胁迫导致红小豆幼苗生长发育受到抑制，不同品种对干旱胁迫的响应存在显著差异，‘东北大红袍’具有较强的适应性，抗旱能力强，而‘晋小豆 5 号’对干旱胁迫敏感，抗旱能力较差，‘保红 947’的抗旱性居于两者之间；叶面积、株高、茎粗、主根长、根鲜重、最大光化学效率、根系活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、SOD 活性、MDA 含量等指标可作为鉴定红小豆苗期抗旱性指标。

## 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 王淑英, 姜小凤, 苏敏, 李倩. 水分胁迫对春小麦光合和渗透调节物质的影响 [J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 364–367.
- [3] 韩金龙, 王同燕, 徐子利, 徐立华, 徐相波, 邢燕菊, 阴卫军. 玉米抗旱机理及抗旱性鉴定指标研究进展 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 142–146.
- [4] 王春艳, 庞艳梅, 李茂松, 王秀芬. 干旱胁迫对大豆

- 气孔特征和光合参数的影响[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(1): 109–115.
- [5] 赵建京, 范志红, 周威. 红小豆保健功能研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(3): 46–50.
- [6] 刘振兴, 周桂梅, 陈健, 程须珍. 红小豆新品种的适生性鉴定与评价[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(5): 19–23.
- [7] 王丽侠, 程须珍, 王素华. 小豆种质资源研究与利用概述[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(3): 440–447.
- [8] 孙丽丽, 董银卯, 李丽, 任晗堃. 红豆生物活性成分及其制备工艺研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(4): 390–396.
- [9] 马淑蓉, 高小丽, 李云, 崔雯雯, 冯佰利, 高金锋, 王鹏科. 不同产量水平小豆叶片的光合特性[J]. 西北农林科技大学学报, 2013, 41(4): 79–85.
- [10] 尹相博, 杨梦璇, 王冰, 于立芝. 铜胁迫对红小豆萌发的影响[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(5): 10–11, 35.
- [11] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 32–227.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 140–143.
- [13] 张永清. 几种谷类作物根土系统的研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2005: 8–9.
- [14] 张智猛, 戴良香, 宋文武, 丁红, 慈敦伟, 康涛, 宁堂原, 万书波. 干旱处理对花生品种叶片保护酶活性和渗透物质含量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 133–141.
- [15] Reddy AR, Chaitanya KV, Vivekanandan M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J]. *J Plant Physiol*, 2004, 161(11): 1189–1202.
- [16] 张仁和, 郭东伟, 张兴华, 路海东, 刘建超, 李凤艳, 郝引川, 薛吉全. 吐丝期干旱胁迫对玉米生理特性和物质生产的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1884–1890.
- [17] 王贺正, 李艳, 马均, 张荣萍, 李旭毅, 汪仁全. 水稻苗期抗旱性指标的筛选[J]. 作物学报, 2007, 33(9): 1523–1529.
- [18] Smucker AJM, Aiken RM. Dynamic root responses to water deficits[J]. *Soil Science*, 1992, 154(4): 281–289.
- [19] Shangguan Z, Shao M, Dyckmans J. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. *J Plant Physiol*, 2000, 156(1): 46–51.
- [20] 冯晓敏, 张永清. 水分胁迫对糜子植株苗期生长和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1513–1521.
- [21] Kondo M, Pablo PP, Aragones DV, Agbosit R, Abe J, Morita S, Courtois B. Genotypic and environmental variations in root morphology in rice genotypes under upland field conditions[J]. *Plant Soil*, 2003, 255(1): 189–200.
- [22] 孙昊, 王茜, 关旸, 刘保东. 粗毛鳞盖蕨干旱胁迫下生理变化规律的研究[J]. 植物科学学报, 2013, 31(6): 576–582.
- [23] 庄伟伟, 李进, 曹满航, 冯文娟, 李茵萍. 盐旱交叉胁迫对银沙槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(6): 730–736.
- [24] 蔡昆争, 吴学祝, 骆世明. 不同生育期水分胁迫对水稻根叶渗透调节物质变化的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 491–500.

(责任编辑:张平)