

燕麦幼苗对干旱-低温交叉适应的生理响应及其综合评价

刘建新,刘秀丽,王金成

(甘肃省高校陇东生物资源保护与利用省级重点实验室,陇东学院生命科学与技术学院,甘肃 庆阳 745000)

摘 要:为探讨干旱能否诱导燕麦对低温的交叉适应性,采用 20%聚乙二醇 6000(PEG)模拟干旱预处理定莖 6 号幼苗 3 d,以未经 PEG 预处理的幼苗作对照,恢复 2 d 后进行低温(昼/夜温度 8℃/5℃)处理,分别在低温处理的 0、1、3、5、7 天采取幼苗叶片,测定超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)、过氧化氢(H_2O_2)、丙二醛(MDA)、抗坏血酸(ASA)、谷胱甘肽(GSH)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白质(SP)、游离氨基酸(AA)和脯氨酸(Pro)含量及相对含水量(RWC)和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性等 14 项生理指标及处理 7 d 后植株株高增量和生物量增量,采用主成分分析和隶属函数综合评价燕麦幼苗对干旱-低温的交叉适应能力。结果表明,与对照相比,干旱预处理显著提高了低温胁迫下燕麦幼苗株高增量和生物量增量, $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 等 14 项生理指标值也发生了不同程度改变。对 14 项生理指标值离差标准化后进行相关性分析表明,不同变量间存在显著相关性。进行主成分分析提取了 5 个主成分因子,其方差贡献率依次为 38.881%、18.219%、11.238%、9.616%和 8.809%,累积方差贡献率达 86.763%。第 1 主成分因子对 SS、AA、Pro、 $O_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2 、RWC、SOD 和 APX 有较大载荷;第 2 主成分因子对 POD、MDA 和 GSH 有较大载荷;第 3 主成分因子主要包括 CAT 和 GSH;第 4 主成分因子主要包括 SP 和 Pro;第 5 主成分因子主要包括 APX 和 ASA。隶属函数分析 5 个主成分因子得分值显示,除第 1 天外,干旱预处理在整个低温处理期间的综合评价价值显著高于对照。研究表明干旱能够诱导燕麦对低温的交叉适应性。

关键词:燕麦;干旱-低温交叉适应;生理响应;综合评价

中图分类号:S543⁺.7;Q945.78 **文献标识码:**A

Comprehensive evaluation and physiological response of *Avena nuda* seedlings to drought and low temperature cross adaptation

LIU Jian-xin, LIU Xiu-li, WANG Jin-cheng

(University Provincial Key Laboratory for Protection and Utilization of Longdong Bio-resources in Gansu Province;
College of Life Sciences and Technology, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: To explore whether drought could induce oat's (*Avena nuda* L.) cross adaptation to low temperature, Dingyou No. 6 seedlings were pretreated with drought condition, simulated by 20% polyethylene glycol 6000 (PEG) for 3 d. After recovering for 2 days, both pretreated and control were treated under low temperature (day/night temperature is 8℃/5℃). 14 physiological indexes of the seedling leaves were determined, including superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$), H_2O_2 , malondialdehyde (MDA), ascorbic acid (ASA), Glutathione (GSH), Soluble sugar (SS), Soluble protein (SP), Amino acid (AA), and proline (Pro) contents, relative water content (RWC) and superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), ascorbate peroxidase (APX) activities at 0, 1, 3, 5, 7 days after low temperature treatment, as well as the plant height increment and biomass increment of oat seedlings 7 days after low temperature stress. Principal component analysis and membership function analysis were used to evaluate the drought and low temperature resistance of oat seedlings. Results showed that compared with the control, drought pretreatment significantly enhanced the plant height increment and biomass increment of oat seedlings under low temperature stress, 14 physiological index values of oat seedling leaves, such as $O_2^{\cdot-}$, H_2O_2 and so

on have also changed in different degree. The correlation analysis of 14 physiological index values after converting standardized deviation showed that there was a significant correlation between different variables. The principal component analysis with 5 principal component factors showed that the variance contribution rate were 38.881%, 18.219%, 11.238%, 9.616% and 8.809% respectively. The cumulative variance contribution rate was 86.763%. For the primary group of principal components, SS, AA, Pro, O_2^- , H_2O_2 , RWC, SOD and APX were the major contributors, while for the secondary group of principal components, POD, MDA and GSH were the major contributors, for the third group of principal components, CAT and GSH were the major contributors, for the fourth group of principal components, SP and Pro were the major contributors, for the fifth group of principal components, APX and ASA were the major contributors. 5 principal component score values in the subordinate function analysis showed that the comprehensive evaluation values of drought pretreatment were significantly higher than control during almost the whole low temperature treatment except the first day. In conclusion, drought could induce the cross adaptation to low temperature in oat seedlings.

Keywords: oat; drought and low temperature cross adaptation; physiological response; comprehensive evaluation

燕麦(*Avena nuda* L.)是禾本科燕麦属一年生小杂粮作物,生育期短、抗逆性强,其籽粒不仅营养价值高^[1],还具有控制血糖、血压和血脂升高的保健功效^[2]。燕麦在中国主要分布于西北、西南和华北等省区,年种植面积约 $1.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[3]。燕麦喜凉爽但不耐寒,幼苗能忍耐 $-2^\circ\text{C} \sim -4^\circ\text{C}$ 的低温。在中国西北地区的早春季节不仅少雨干旱,而且倒春寒气候时常发生,干旱和低温交叉胁迫成为影响燕麦幼苗生长发育,继而影响产量和品质的制约因素。因此,探讨燕麦幼苗干旱-低温交叉适应的生理机制,对减轻燕麦低温逆境胁迫和高产稳产栽培具有重要意义。

植物遭受某种不良环境后不仅增强这种特定环境的适应能力,还能产生抵抗其它不良环境的能力称为植物的交叉适应^[4]。关于植物交叉适应的研究目前主要集中在干旱、盐胁迫、高温和低温等方面,人们对植物交叉适应的机理尚缺乏深入和全面的了解。张俊环和黄卫东^[5]研究得出,高温锻炼和低温锻炼能够诱导葡萄幼苗对温度逆境的交叉适应性,认为高温锻炼诱导的葡萄抗冷性和低温锻炼诱导的耐热性有着相似的抗氧化保护机制。Streb 等^[6]研究表明,低温和重金属诱导的豌豆对低温下光系统 II 保护能力的增强与叶片抗坏血酸和谷胱甘肽含量提高相关。小麦^[7]和黄瓜^[8]对干旱-低温适应能力的增强与渗透溶质含量和渗透调节能力提高有关。研究发现,早盐交叉胁迫下适量土壤含盐量会通过提高渗透调节^[9]和抗氧化系统活性^[10]缓解轻、中度干旱胁迫对燕麦幼苗的伤害。为进一步了解干旱能否增强燕麦对低温胁迫的交叉适应能力,本研究采用聚乙二醇 6000(PEG)模拟干

旱预处理燕麦幼苗,检测低温胁迫下燕麦叶片活性氧物质、膜脂过氧化产物、渗透调节物质含量和抗氧化系统活性及植株生长状况,采用主成分和隶属函数分析综合评价干旱诱导燕麦幼苗低温交叉适应的作用,旨在为探索燕麦苗期抗寒新途径提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

试验于 2015 年 4-7 月在甘肃省高校陇东生物资源保护与利用重点实验室进行。供试燕麦品种为‘定莜 6 号’(种子由甘肃省定西市旱作农业科研推广中心提供)。挑选饱满一致、无病虫害的种子,用自来水清洗干净后浸泡 6 h,播种在装有珍珠岩的培养皿(直径 12 cm)中,每皿播 200 粒左右,共播种 180 个培养皿。浇足水后置于人工气候箱中萌发生长,常规管理。人工气候箱昼/夜温度 $25^\circ\text{C}/16^\circ\text{C}$,光周期 13 h/11 h(昼/夜),光照强度 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,湿度 65%~75%。当幼苗 2 叶 1 心期时浇灌 1 次 Hoagland 营养液以补充养分,再培养 7 d 后进行处理。将 180 个培养皿幼苗分成两组,每组 90 个,其中一组用 20% PEG 浇灌幼苗以模拟干旱胁迫,3 d 后幼苗叶片出现萎蔫,然后用蒸馏水清洗培养皿中 PEG,洗净后加入 Hoagland 营养液培养 2 d 至幼苗恢复正常;同时,另外一组以未经 PEG 处理的幼苗作为对照(CK)。然后将干旱预处理及对照幼苗放入人工气候箱中进行昼/夜温度为 $8^\circ\text{C}/5^\circ\text{C}$ (甘肃省中部燕麦种植区 3~4 月份遭倒春寒后常见的低温)低温胁迫。每组处理 3 次重复,随机排列,每天交换培养皿位置以保证光温条件一致,分别于低温

处理的 0、1、3、5、7 d 从上往下取幼苗 1~2 片全展叶,用液氮速冻后-70℃保存,用于测定相关生理指标。低温处理 7 d 后测定植株株高增量和生物量增量。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 株高增量和生物量增量 幼苗低温胁迫前及低温胁迫 7 d 后用直尺测量 30 株植株从茎基部到叶尖的高度,计算株高增量 $\Delta h(\text{cm}) = \text{低温胁迫 7 d 后株高}(h_2) - \text{低温胁迫前株高}(h_1)$ 。分别取 100 株低温胁迫前和低温胁迫 7 d 后幼苗,在 105℃杀青 30min 后 70℃烘至恒重称生物量,计算生物量增量 $\Delta m(\text{g}) = \text{低温胁迫 7 d 后生物量}(m_2) - \text{低温胁迫前生物量}(m_1)$ 。

1.2.2 植株相对含水量、 O_2^- 和 H_2O_2 含量 取 50 株幼苗称鲜重 (W_1) 后浸入盛有蒸馏水的烧杯中使其吸水饱和 24 h 称饱和重 (W_2),然后置于烘箱中 105℃杀青 30 min 后,70℃烘干至恒重称干重 (W_3),计算相对含水量 (%) = $(W_1 - W_3) / (W_2 - W_3) \times 100$ 。

称取 0.50 g 叶片,用 5 mL 50 mmol · L⁻¹ 磷酸缓冲液 (PBS, pH 7.0) 研磨,12 000 r · min⁻¹ 4℃离心 30 min,取上清液按 Sui 等^[11] 的方法测定超氧阴离子 (O_2^-) 含量, H_2O_2 含量参照 Sergiev 等^[12] 的方法测定,膜脂过氧化产物丙二醛 (MDA) 含量测定采用李合生^[13] 的方法。

1.2.3 抗氧化酶活性和抗氧化物质含量 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性及抗坏血酸 (ASA) 和谷胱甘肽 (GSH) 含量均按陈建勋和王晓峰^[14] 的方法测定。

1.2.4 渗透调节物质含量 采用李合生^[13] 的蒽酮比色法、考马斯亮蓝法、茚三酮染色法和碘基水杨酸法分别测定可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白质 (SP)、游离氨基酸 (AA) 和脯氨酸 (Pro) 含量。

1.3 数据统计分析

为克服单一指标评价带来的片面性,对检测的 14 项生理指标值采用 SPSS 20.0 软件离差标准化后进行主成分分析,得到不同处理时间主成分的得分值后再计算隶属函数值,然后根据主成分分析方差贡献率的大小计算出各主成分的加权综合评价值 (D 值),再对 D 值进行单因素方差分析, Duncan 法检验差异显著性 ($P < 0.05$),最后用 Excel 2003 将 D 值与不同处理时间作图,以平均值 $\pm$ 标准差表示 D 值结果。

原始数据离差标准化值 X_j 用公式:

正相关

负相关

$$\left. \begin{aligned} X_j &= (y_j - \bar{y}_j) / S_j \\ X_j &= 1 - (y_j - \bar{y}_j) / S_j \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\bar{y}_j$ 、 S_j 分别是第 j 指标原始数据 y_j 的平均值和标准差。

隶属函数值 $U(X_j)$ 计算用公式:

$$U(X_j) = (X_j - X_{jmin}) / (X_j - X_{jmax}) \quad (2)$$

式中, X_{jmin} 、 X_{jmax} 分别是第 j 个综合指标 X_j 的最小值和最大值。

综合指标权重 W_j 计算用公式:

$$W_j = P_j / \sum P_j \quad (3)$$

式中, P_j 为各处理组第 j 个主成分的特征值。

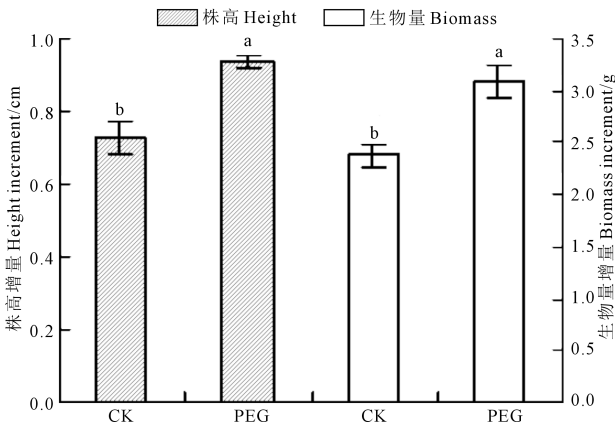
综合评价值 D 计算用公式:

$$D = \sum [U(X_j) \times W_j], j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 PEG 预处理对低温胁迫下燕麦幼苗生长状况的影响

从图 1 可见,与 CK 相比,PEG 模拟干旱预处理显著提高了燕麦幼苗在低温胁迫下的株高增量和生物量增量,增幅分别为 28.0% 和 30.1%。



注:不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平下差异显著,下同。
Note: The different letters mean significant differences at $P < 0.05$.

The same below.

图 1 PGE 预处理对低温下燕麦株高和生物量增量的影响
Fig.1 Effect of PEG pretreatment on the height increment and biomass increment of oat seedlings under low temperature stress

2.2 PEG 预处理对低温胁迫下燕麦幼苗生理指标的影响

从表 1 可见,用 PEG 预处理的燕麦幼苗在低温胁迫下 14 项生理指标与 CK 相比均发生了不同程度的改变,为避免由单个或某几个指标评价带来的片面性,采用主成分和隶属函数分析综合评价干旱预处理对低温胁迫燕麦生理代谢的影响。为消除

不同变量量纲和数量级差异的影响,首先将原始值(表 1)按公式(1)进行离差标准化,为避免正向指标和负向指标所反映信息抵消,对低温耐性负相关的 O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 采用反离差标准化转换,再求出

14 项生理指标标准化数据的 Pearson 相关系数(表 2)。从 Pearson 相关系数可知,不同变量间存在显著的相关性,存在信息重叠,可以进行主成分分析。

表 1 低温胁迫下燕麦幼苗生理指标										
Table 1 Physiological indexes in leaves of oat seedlings under low temperature stress										
指标 Index	PEG					CK				
	0 d	1 d	3 d	5 d	7 d	0 d	1 d	3 d	5 d	7 d
$O_2^-/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	0.383	0.179	0.032	0.018	0.230	0.656	0.225	0.062	0.027	0.116
$H_2O_2/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	1.433	3.753	4.303	3.477	6.097	1.410	2.103	4.587	2.983	1.433
MDA/ $(\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	1.543	3.573	21.013	5.453	4.180	3.543	5.590	3.960	2.857	1.543
SOD/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	30.80	33.97	28.20	22.50	21.77	33.27	33.00	31.53	35.03	30.80
CAT/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	471.7	702.0	647.3	1264.0	70.7	330.0	233.3	577.3	269.0	471.7
POD/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	9.53	15.77	31.55	20.52	11.42	8.48	11.97	11.55	18.25	9.53
APX/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	3.94	5.833	3.19	3.36	2.88	4.05	5.88	3.25	3.08	3.94
ASA/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	23.00	22.47	38.33	58.13	48.43	14.07	59.13	38.00	28.37	23.33
GSH/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	4.153	2.243	1.993	6.737	3.683	5.047	3.780	5.487	5.177	4.153
SS/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	1.32	2.68	2.55	4.43	5.20	1.30	2.24	2.56	4.66	1.32
SP/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	38.30	52.33	57.53	41.87	75.67	44.13	53.53	91.10	32.47	38.30
AA/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	1.32	2.68	2.55	4.43	5.14	1.37	3.54	2.28	4.66	1.32
Pro/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	0.170	0.321	0.673	0.372	0.940	0.144	0.106	0.161	0.812	0.170
RWC/%	84.9	75.3	73.9	62.0	51.2	66.5	62.6	63.4	53.6	84.9

注: O_2^- : 超氧阴离子; H_2O_2 : 过氧化氢; MDA: 丙二醛; SOD: 超氧化物歧化酶; CAT: 过氧化氢酶; POD: 过氧化物酶; APX: 抗坏血酸过氧化物酶; ASA: 抗坏血酸; GSH: 谷胱甘肽; SS: 可溶性糖; SP: 可溶性蛋白质; AA: 游离氨基酸; Pro: 脯氨酸; RWC: 相对含水量。下同。
Note: O_2^- : superoxide anion; H_2O_2 : hydrogen peroxide; MDA: malondialdehyde; SOD: superoxide dismutase; CAT: catalase; POD: peroxidase; APX: ascorbate peroxidase; ASA: ascorbic acid; GSH: glutathione; SS: soluble sugar; SP: soluble protein; AA: amino acid; Pro: proline; RWC: relative water content. The same below.

表 2 变量之间的相关系数														
Table 2 Correlation coefficient of 14 variables oat seedling														
	O_2^-	H_2O_2	MDA	SOD	CAT	POD	APX	ASA	GSH	SS	SP	AA	Pro	RWC
O_2^-	1.000													
H_2O_2	-0.571 *	1.000												
MDA	-0.365 *	0.295	1.000											
SOD	-0.268	0.637 *	0.220	1.000										
CAT	0.355	0.082	-0.174	-0.090	1.000									
POD	-0.591 *	-0.248	-0.764 *	-0.133	0.410 *	1.000								
APX	-0.282	0.476 *	0.210	0.525 *	0.026	-0.219	1.000							
ASA	0.474 *	-0.244	-0.175	-0.315	0.248	0.214	0.028	1.000						
GSH	0.087	-0.047	0.373 *	-0.401 *	0.116	-0.270	-0.443 *	-0.097	1.000					
SS	0.604 *	-0.710 *	0.017	-0.589 *	-0.042	0.216	-0.510 *	0.476 *	0.355	1.000				
SP	-0.215	-0.688 *	-0.134	-0.272	-0.176	-0.119	-0.198	0.117	-0.043	0.123	1.000			
AA	0.574 *	-0.602 *	0.016	-0.529 *	-0.122	0.181	-0.316	0.608 *	0.308	0.953 *	0.064	1.000		
Pro	0.423 *	-0.605 *	-0.289	-0.342	-0.235	0.417 *	-0.566 *	0.354	-0.169	0.756 *	0.035	0.673 *	1.000	
RWC	-0.299	0.564 *	-0.095	0.475 *	0.377 *	0.078	0.426 *	-0.441 *	-0.572 *	-0.784 *	-0.259	-0.807 *	-0.452 *	1.000

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关。Note: * Show significant correlation at 0.05 levels.

2.3 离差标准化数据的主成分分析

采用 SPSS 20.0 软件进行主成分分析,由表 3 可以看出,燕麦 14 项生理指标可转化为 5 个主成分因子,第 1 主因子的贡献率为 38.881%,第 2 主因子的贡献率为 18.219%,第 3 主因子的贡献率为 11.238%,第 4 主因子的贡献率为 9.616%,第 5 主因子的贡献率为 8.809%,这 5 个主因子的累积贡献率

达 86.763%,具有较强的信息代表性。因此,可用这 5 个主因子代替 14 个单项指标进行概括分析。主因子 1 对 SS、AA、Pro、 O_2^- 有较大的正载荷,而对 H_2O_2 、RWC、SOD 和 APX 有较大的负载荷;主因子 2 对 POD 有较大正载荷,对 MDA、GSH 有较大负载荷;主因子 3 主要包括 CAT、GSH;主因子 4 主要包括 SP、Pro;主因子 5 主要包括 APX、ASA。

2.4 PEG 预处理对燕麦幼苗耐冷性的隶属函数综合评价

将主成分得分系数(表 3)乘以各标准化原始变量后求和可得各处理的综合指标值 $CI(x)^{[15]}$,见表 4。根据公式(2)计算各处理综合指标值的隶属函数值 $U(X_j)$,再根据公式(3)计算可得 5 个综合指标的权重 W_j 分别为 0.448、0.210、0.130、0.111、0.102,然后根据公式(4)计算得到隶属函数综合评价价值 D (表 4)。 D 值越大,植株耐低温的能力越强。为了更加直观显示低温胁迫下 PEG 预处理后燕麦

幼苗综合评价价值(D 值)与 CK 的差异,将表 4 中的 D 值与处理时间作图。从图 2 可见,不论是 CK 幼苗还是 PEG 处理的幼苗与低温胁迫前相比, D 值随低温胁迫时间延长呈递增趋势,PEG 处理的幼苗在低温处理 7 d 时 D 值有所下降。然而,除第 1 天 CK 幼苗的 D 值高于 PEG 处理的幼苗外,在低温胁迫的第 0、3、5、7 天 PEG 处理幼苗的 D 值显著高于 CK。表明干旱预处理更能增强燕麦幼苗对低温的适应能力。

表 3 各主因子的系数、得分系数、特性值和贡献率

Tab.3 Coefficient, score coefficient, eigenvalue and contribution rate of principal factors					
项目 Item	主因子 1 Principal factor 1	主因子 2 Principal factor 2	主因子 3 Principal factor 3	主因子 4 Principal factor 4	主因子 5 Principal factor 5
O ₂ ⁻	0.690(0.127)	0.434(0.170)	0.238(0.151)	0.098(0.073)	0.156(0.127)
H ₂ O ₂	-0.841(-0.154)	-0.051(-0.020)	0.341(0.217)	-0.291(-0.216)	0.080(0.065)
MDA	-0.267(-0.049)	-0.781(-0.306)	0.238(0.151)	-0.004(-0.003)	0.246(0.199)
SOD	-0.706(-0.130)	0.100(0.039)	-0.113(-0.072)	-0.215(-0.159)	0.329(0.267)
CAT	-0.022(-0.004)	0.522(0.204)	0.715(0.454)	0.209(0.155)	-0.180(-0.146)
POD	0.366(0.067)	0.832(0.326)	0.085(0.054)	-0.244(-0.181)	-0.101(-0.082)
APX	-0.627(-0.115)	0.094(0.037)	0.046(0.029)	0.177(0.131)	0.637(0.516)
ASA	0.450(0.083)	0.229(0.090)	0.309(0.196)	0.408(0.303)	0.506(0.410)
GSH	0.306(0.056)	-0.600(-0.235)	0.582(0.370)	0.064(0.048)	-0.374(-0.303)
SS	0.929(0.171)	-0.178(-0.070)	0.113(0.072)	-0.192(-0.143)	0.161(0.131)
SP	0.344(0.063)	-0.054(-0.021)	-0.478(-0.304)	0.770(0.572)	-0.083(-0.068)
AA	0.874(0.160)	-0.187(-0.073)	0.143(0.091)	-0.168(-0.125)	0.379(0.307)
Pro	0.740(0.136)	0.139(0.055)	-0.337(-0.214)	-0.489(-0.363)	0.080(0.065)
RWC	-0.759(-0.139)	0.515(0.202)	0.018(0.011)	0.055(0.041)	-0.085(-0.069)
特征值 Eigen value	5.443	2.551	1.573	1.346	1.233
贡献率/% Contribution rate	38.881	18.219	11.238	9.616	8.809
累积贡献率/% Cumulative contribution rate	38.881	57.100	68.338	77.954	86.763

注:括号内数值为得分系数。Note: The value in bracket is score coefficient.

表 4 各处理的综合指标值 $CI(x)$ 、权重 W_j 、隶属函数值 $U(X_j)$ 和综合评价价值(D)

Tab.4 The value of comprehensive index $CI(x)$, index weight (W_j), subordinate function values $U(X_j)$ and comprehensive evaluation (D) of each treatment												
处理 Treatment	时间 Time/d	$CI(1)$	$CI(2)$	$CI(3)$	$CI(4)$	$CI(5)$	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	D
PEG	0	-1.445	-0.176	0.215	-0.330	-0.665	0.032	0.252	0.417	0.444	0.133	0.184
	1	-0.776	0.630	-0.281	0.076	0.994	0.249	0.459	0.296	0.538	0.645	0.372
	3	0.348	2.492	-0.910	-0.301	-0.779	0.613	0.937	0.143	0.451	0.098	0.550
	5	0.808	0.448	2.529	0.309	-0.158	0.762	0.412	0.982	0.592	0.289	0.650
	7	1.468	-0.771	-1.431	0.176	0.595	0.976	0.099	0.015	0.561	0.521	0.575
CK	0	-1.470	-0.933	-0.299	-0.523	-0.982	0.024	0.057	0.292	0.399	0.035	0.109
	1	-0.612	-0.075	0.181	0.744	2.069	0.302	0.278	0.409	0.693	0.976	0.423
	3	0.026	-0.236	-0.248	1.949	-0.627	0.509	0.236	0.304	0.972	0.144	0.439
	5	0.572	-0.382	0.240	-2.150	0.634	0.686	0.199	0.424	0.022	0.533	0.460
	7	1.079	-0.998	0.004	0.050	-1.080	0.850	0.040	0.366	0.532	0.005	0.496
权重 Weight W_j							0.448	0.210	0.130	0.111	0.102	

3 讨 论

干旱和低温胁迫下,植物体内活性氧(ROS)积累产生氧化胁迫,会造成生物膜结构的损伤和功能丧失,而抗氧化系统在植物防御氧化胁迫伤害方面发挥着重要作用^[5]。植物体内参与抗氧化防御反应的酶类主要有 SOD、CAT、POD、APX 等,抗氧化物质有 ASA、GSH 等,这些抗氧化酶和抗氧化物质共同构成抗氧化系统,各自分工与协同运作将 O₂⁻和 H₂O₂等这些 ROS 转化为 H₂O 和 O₂,从而减轻 ROS 对细胞的氧化伤害^[10]。与此同时,植物在干旱和低温下往往会出现植株水分的亏缺,为了减轻细胞过多失水,胞质常会积累可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质来增强对干旱和低温的抵抗能力^[8-9]。因此,本研究检测了与 ROS 代谢和渗透调节相关的 O₂⁻、H₂O₂、MDA、SOD、CAT、POD、APX、ASA、GSH 及 SS、SP、AS、Pro、RWC 14 项生理指标,从生理代谢角度探讨燕麦幼苗对干旱-低温的交叉适应性。

植物的抗性表现是诸多生理代谢综合作用的结果,若以单个或少数几个指标的改变很难全面和准确评价植物对干旱-低温的交叉适应性。因此,本研究未逐一考察单个指标对燕麦干旱-低温交叉胁迫的响应,而是将上述检测的 14 项生理指标值离差标准化后采用主成分分析,将 14 个存在信息重叠的单项指标综合为 5 个相互独立的主成分变量,这 5 个主成分变量的特征值分别为 5.443、2.551、1.573、1.346、1.233,贡献率分别为 38.881%、18.219%、11.238%、9.616%、8.809%,累积贡献率达 86.763%(表 3),说明用这 5 个主成分因子代替 14 个单项指标具有较强的信息代表性。由此,计算 5 个主成分因子的得分系数(表 3),再乘以相应标准化原始变量值后求和得到不同处理时间的综合变量得分值(表 4)。根据各主成分因子贡献率的大小确定其相对权重,进行隶属函数加权分析。结果表明,干旱预处理显著提高了燕麦幼苗在低温胁迫下的综合评价价值(图 2),说明干旱能够增强燕麦对低温的交叉适应性。另外,干旱预处理提高低温下燕麦幼苗株高增量和生物量增量(图 1)进一步证明了这个结论。这与前人在小麦^[7]和黄瓜^[8]上的研究结果一致。然而,人们对植物交叉适应的机理还知之甚少。多年生黑麦草经中度干旱后可使低温下的叶片相对含水量、叶绿素含量降幅减小,而脯氨酸、可溶性糖含量和抗氧化酶活性增加^[16]。干旱诱导黄瓜对低温交叉适应性的提高与渗透调节能力增强有关^[8]。本试验表明,干旱预处理燕麦能够通过改善

体内 ROS 代谢平衡和渗透溶质积累,增强对低温的耐受能力,从而可为生产上燕麦苗期低温伤害预防提供参考。Janicka-Russak 等^[17]报道,低温改变植物质膜 H⁺-ATP 酶基因表达及酶蛋白的磷酸化修饰。Romanenko 等^[18]研究表明,抗寒锻炼使低温下植物亚细胞隔室中的一些蛋白(如脱水蛋白)产生积累和转移。干旱诱导植物低温交叉适应的分子机理尚需进一步深入探讨。

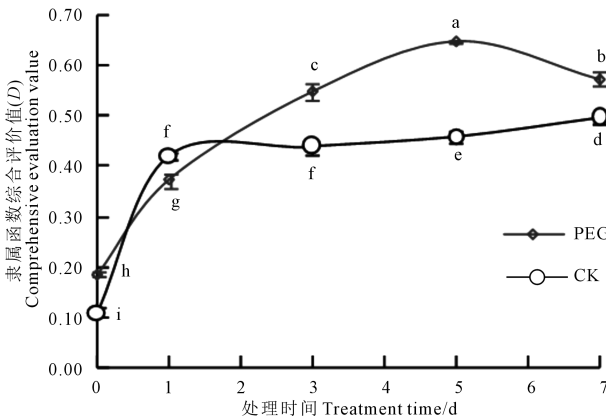


图 2 燕麦幼苗对干旱-低温交叉适应的综合评价
Fig.2 The comprehensive evaluation of cross adaptation of oat seedlings to drought-low temperature

参 考 文 献:

[1] 周青平, 贾志锋, 韩志林, 等. 氮、磷肥对裸燕麦子粒产量和β-葡聚糖含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 956-960.

[2] Drzikova B, Dongowski G, Gebhardt E. Dietary fibre-rich oat-based products affect serum lipids, microbiota, formation of short-chain fatty acids and steroids in rats [J]. British Journal of Nutrition, 2005, 94(6): 1012-1025.

[3] 林叶春, 曾昭海, 任长忠, 等. 局部根区灌溉对裸燕麦光合特征曲线及叶绿素荧光特性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1062-1070.

[4] Bahmani M, Maali-Amiri R. Genetic regulation of cross tolerance in plants under biotic and abiotic stresses [J]. Dermatologic Therapy, 2015, 19(6): 326 - 337.

[5] 张俊环, 黄卫东. 葡萄幼苗在温度逆境交叉适应过程中活性氧及抗氧化酶的变化[J]. 园艺学报, 2007, 34(5): 1073-1080.

[6] Streb P, Aubert S, Gout E, et al. Cross tolerance to heavy-metal and cold-induced photoinhibition in leaves of Pisum sativum acclimated to low temperature [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2008, 14(3): 185 - 193.

[7] 李洁, 武杭菊, 胡景江, 等. 干旱-低温交叉逆境下小麦渗透调节能力的变化与交叉适应的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 149-153.

(下转第 186 页)