

渗透胁迫对花生幼叶细胞活性氧伤害的定量分析

朱锦懋, 陈由强, 叶冰莹, 代容春, 林荣华

(福建师范大学生物工程学院, 福建 福州 350007)

摘要: 在渗透胁迫条件下不同花生 (*Arachis hypogaea* Linn.) 品种的水势、质膜相对透性 (RPMP)、超氧离子、丙二醛 (MDA) 含量和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性两两之间都呈显著相关。而花生各品种的过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性、谷胱甘肽含量和抗坏血酸含量与水势、RPMP、超氧离子、MDA 含量和 SOD 活性等指标之间相关程度波动较大。水势对 RPMP、MDA 含量、超氧离子和 SOD 活性的弹性系数处于负效应阶段。SOD 活性对 RPMP、MDA 含量和超氧离子的弹性系数的效应处于递减阶段。超氧离子对 RPMP 和 MDA 含量的弹性系数的效应处于递减阶段。各指标的弹性系数和相应的边际量因花生品种的抗旱能力不同而异。

关键词: 数学方法; 活性氧; 渗透胁迫; 花生

中图分类号: Q945.78; S565.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-0978(2001)02-0014-07

A quantitative analysis on the effects of osmotic stress on active oxygen damage in varieties of peanut
ZHU Jin-mao, CHEN You-qiang, YE Bing-ying, DAI Rong-cun, LIN Rong-hua (Bioengineering College, Fujian Teachers University, Fuzhou 350007, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2001, 10(2): 14-20

Abstract: This paper dealt with a quantitative analysis of the effect of different physiological indexes on cell injury of detached leaves of peanut (*Arachis hypogaea* Linn.) under osmotic stress. The result showed that the correlations between water potential, relative plasma membrane permeability (RPMP), MDA, superoxides and SOD were significant. The correlations between CAT, POD, GSH, AsA and water potential, RPMP, superoxides, MDA, and SOD varied rather highly with different peanut varieties. The effects of water potential on productive elasticities of RPMP, MDA, superoxides and SOD were in negative stage. The effects of SOD on productive elasticities of RPMP, MDA and superoxides were in decreasing progressively stage. The effects of superoxides on productive elasticities of RPMP and MDA were in decreasing progressively stage. The productive elasticities and responsible marginal yields are varied with the drought resistant ability of various peanut varieties.

Key words: mathematics method; active oxygen; osmotic stress; *Arachis hypogaea* Linn.

花生 (*Arachis hypogaea* Linn.) 是我国重要油料作物, 旱地种植面积大, 干旱常成为限制高产的重要原因, 因此, 选育耐旱品种是提高花生产量的重要途径。生物自由基伤害学说认为植物体内 O_2^- 自由基大量产生的毒害之一是引发膜脂过氧化作用, 造成细胞膜系统的破坏, 严重时导致细胞死亡。生物体中存在清除 O_2^- 的保护系统, 其中最重要的是超氧化物歧化酶 (SOD)^[1]。本研究应用弹性系数分析和边际量分析的方法探讨不同品种花生在渗透胁迫条件下水势与质膜相对透性、丙二醛 (MDA) 含量、 O_2^- 和 SOD 活性各指标间的数学模型、弹性系数及边际量, 为研究在渗透胁迫条件下花生幼叶细胞自由基的伤害机理, 探索一条定量分析途径, 也为生产上采取有效措施, 提高作物产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

花生试样由福建农业大学作物科学学院花生育种“九五”攻关课题组提供, 品种为白皮 1 号 (BAIPIYIHAO)、泉花 10 号 (QUANHUASHIHAO) 和汕油 71 (SHANYOUQISHIYI), 抗旱能力依次为白皮 1 号 > 泉花 10 号 > 汕油 71。

收稿日期: 2000-10-08

基金项目: 福建省科学技术委员会自然科学基金资助项目 (K92020)

作者简介: 朱锦懋 (1958-), 男, 福建古田人, 博士, 副教授, 从事植物生态生理学和植物分子生物学研究。

1.2 渗透胁迫处理

花生种子播种于种植箱中,每天浇水,保持土壤湿润。出苗 20 d 左右,选取生长稳定,大小一致的花生幼叶,避开主脉用 10 mm 孔径打孔器钻取叶片供试。取一定数量的叶小圆片,分别置于渗透势为 -0.25、-0.75、-1.25 和 -1.75 mPa 的 PEG-6000 溶液中,在自然光和 25℃ 下浸没 12 h,随机取拭干叶圆片供各项测定用。

1.3 测定方法

叶水势(Ψ_L)和过氧化物酶(POD)活性的测定按华东师范大学的方法^[2];质膜相对透性(RPMP)按陈由强方法^[3];超氧化物歧化酶(SOD)活性按王爱国等的方法^[4];过氧化氢酶(CAT)活性按中山大学的方法^[5];超氧离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率按罗广华等的方法^[6];丙二醛(MDA)含量按张承烈方法^[7];谷胱甘肽(GSH)含量按 X. H. 波钦诺克方法^[8];抗坏血酸(AsA)含量按 Arakawa 的方法^[9]。每个处理重复测定 3 次。

1.4 生理指标的效应函数分析方法

花生 3 个品种在渗透胁迫条件下各个生理指标的测定数据见表 1~3。数据用 STATISTICA Version 5.0 软件包进行统计处理。

1.4.1 生理指标效应的弹性系数(EP)分析

为了反映某一生理指标的变动率与影响该指标因素的变化率的比值,即增加或减少 1%,引起该指标变动百分数的数值,以表达影响该指标因素的效应规律,采用弹性系数分析:

$$EP = (\Delta y/y)/(\Delta x/x) = (y/x)/(y/x) = \beta$$

当 $EP > 1$ 时,效应处于递增阶段;当 $0 < EP < 1$ 时效应处于递减阶段。当 $EP < 0$ 时处于负效应阶段^[10]。

1.4.2 生理指标效应的边际量分析(MPP) 为了能够反映连续追加每一单位的量所导致受其影响的另一生理指标总量的增加量情况,采用边际量效应分析法进行分析^[10]:

$$MPP = y/x = \beta(y/x) = \beta(\sum y_i/\sum x_i)$$

2 结果与分析

2.1 在渗透胁迫条件下不同品种花生生理指标之间的相关关系

从表 4~6 看出,3 个花生品种的水势、RPMP、超氧离子、MDA 和 SOD 两两之间都显著相关。而各品种的 CAT、POD、GSH 和 AsA 与水势、RPMP、超氧离子、MDA 和 SOD 等指标之间相关程度不一。因此,作者认为对水势、RPMP、超氧离子、MDA 和 SOD 之间进行数学模型拟合及弹性系数和边际量的分析才有意义。

表 1 在渗透胁迫条件下花生品种白皮 1 号的生理指标¹⁾

Table 1 Physiological indices of variety BAIPIYIHAO of peanut under osmotic stress¹⁾

Os (mPa)	Ψ_L (mPa)	RPMP (%)	$O_2^{\cdot-}$ [nmol/(mg·min)]	MDA (nmol/mg)	SOD (U)	CAT (U)	POD (U)	GSH (μ mol/g)	AsA (μ mol/g)
0	-0.57	8.74	2.75	20.82	52.76	170.92	286.01	1.75	193.02
0	-0.62	9.20	2.39	25.06	50.53	163.37	263.27	1.68	184.34
0	-0.61	8.99	2.64	23.41	51.62	174.08	276.91	1.61	196.87
-0.25	-0.67	12.50	3.16	25.33	58.44	203.87	321.18	1.87	264.56
-0.25	-0.70	14.32	3.44	21.51	54.05	194.47	308.17	1.65	257.25
-0.25	-0.71	13.25	3.01	23.06	56.46	198.29	314.43	1.84	271.73
-0.75	-0.94	19.29	5.42	65.49	87.31	239.75	375.38	4.07	299.25
-0.75	-0.88	20.18	5.08	53.75	82.08	236.45	382.24	4.11	276.36
-0.75	-0.90	22.75	5.24	58.03	80.86	220.83	384.36	3.97	285.28
-1.25	-1.21	28.09	8.77	87.52	124.84	320.97	324.16	2.33	224.45
-1.25	-1.24	31.51	8.25	82.41	138.50	318.41	315.38	2.51	241.23
-1.25	-1.21	31.24	8.56	82.07	128.27	302.74	326.05	2.49	231.89
-1.75	-1.61	41.29	7.20	63.98	159.33	279.01	200.60	1.27	198.33
-1.75	-1.59	42.97	7.63	55.34	148.04	273.47	213.16	1.09	201.36
-1.75	-1.68	40.08	7.39	65.54	156.57	260.18	216.32	1.11	214.78

¹⁾ Os: 渗透胁迫 osmotic stress; Ψ_L : 水势 water potential; RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; $O_2^{\cdot-}$: 超氧离子(示每毫克蛋白质中的含量) superoxide (the amount in per milligram protein); MDA: 丙二醛含量(示每毫克蛋白质中的含量) content of malonic dialdehyde (the amount in per milligram protein); SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase; CAT: 过氧化氢酶活性 activity of catalase; POD: 过氧化物酶活性 activity of peroxidase; GSH: 谷胱甘肽含量 content of glutathione; AsA: 抗坏血酸含量 content of ascorbic acid.

表 2 在渗透胁迫条件下花生品种泉花 10 号的生理指标¹⁾Table 2 Physiological indices of variety QUANHUASHIHAO of peanut under osmotic stress¹⁾

Os (mPa)	Ψ_L (mPa)	RPMP (%)	O_2^- [nmol/(mg·min)]	MDA (nmol/mg)	SOD (U)	CAT (U)	POD (U)	GSH (μ mol/g)	AsA (μ mol/g)
0	-0.61	9.24	3.72	30.26	44.03	184.32	189.03	2.07	187.45
0	-0.64	8.02	4.05	25.67	48.36	174.19	193.26	1.89	196.29
0	-0.58	9.45	3.89	28.37	46.24	179.83	185.22	1.94	182.37
-0.25	-0.74	15.90	4.33	33.04	48.68	195.07	206.67	1.90	221.31
-0.25	-0.72	18.40	4.54	31.72	53.45	197.38	219.36	1.83	218.28
-0.25	-0.71	16.47	4.04	30.88	54.66	209.81	214.17	1.94	214.25
-0.75	-0.94	26.33	7.25	85.27	78.13	214.22	236.55	3.21	165.20
-0.75	-0.93	25.84	7.93	80.49	80.28	207.91	247.40	3.19	153.32
-0.75	-0.90	25.77	7.04	83.23	76.42	216.71	239.36	3.05	164.28
-1.25	-1.24	38.32	10.35	124.79	80.02	264.73	200.13	1.96	154.28
-1.25	-1.23	39.21	12.07	119.71	88.33	259.08	205.35	1.83	167.44
-1.25	-1.22	41.55	11.22	114.38	85.35	251.17	198.36	1.81	159.77
-1.75	-1.68	48.33	12.33	117.72	93.88	163.28	84.56	0.74	121.55
-1.75	-1.72	46.59	15.29	109.39	90.20	173.55	89.35	0.82	134.06
-1.75	-1.70	47.66	14.01	104.37	95.84	178.24	89.22	0.87	124.51

¹⁾ Os: 渗透胁迫 osmotic stress; Ψ_L : 水势 water potential; RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; O_2^- : 超氧离子 superoxide (the amount in per milligram protein); MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde (the amount in per milligram protein); SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase; CAT: 过氧化氢酶活性 activity of catalase; POD: 过氧化物酶活性 activity of peroxidase; GSH: 谷胱甘肽含量 content of glutathione; AsA: 抗坏血酸含量 content of ascorbic acid.

表 3 在渗透胁迫条件下花生品种汕油 71 的生理指标¹⁾Table 3 Physiological indices of variety SHANYOUQISHIYI of peanut under osmotic stress¹⁾

Os (mPa)	Ψ_L (mPa)	RPMP (%)	O_2^- [nmol/(mg·min)]	MDA (nmol/mg)	SOD (U)	CAT (U)	POD (U)	GSH (μ mol/g)	AsA (μ mol/g)
0	-0.70	8.97	5.79	28.57	40.63	159.60	161.22	1.45	174.44
0	-0.68	9.22	4.35	25.90	36.25	178.19	179.05	1.61	187.20
0	-0.66	8.45	5.63	26.38	37.80	157.35	174.70	1.63	169.66
-0.25	-0.74	16.35	7.52	43.13	44.39	121.19	208.06	1.81	165.21
-0.25	-0.72	17.44	7.00	40.33	45.08	135.82	214.55	1.71	159.56
-0.25	-0.75	18.97	7.21	45.02	48.31	117.37	219.06	1.74	165.88
-0.75	-0.95	27.22	10.32	98.58	57.99	157.02	253.14	2.52	201.05
-0.75	-0.97	24.59	13.55	101.32	53.76	164.49	241.02	2.64	216.91
-0.75	-0.99	29.33	11.73	107.47	55.04	151.34	249.21	2.69	215.37
-1.25	-1.24	40.31	18.21	149.20	92.02	114.51	165.61	1.05	154.24
-1.25	-1.28	43.72	16.52	153.14	85.53	109.39	157.28	1.17	159.37
-1.25	-1.25	39.08	16.37	152.63	87.60	125.27	163.24	0.98	148.26
-1.75	-1.74	53.21	14.23	128.75	82.84	83.26	78.25	0.52	64.21
-1.75	-1.72	50.77	15.48	139.17	74.92	97.43	65.26	0.61	73.25
-1.75	-1.7	52.48	17.05	136.40	78.34	90.18	71.90	0.68	79.26

¹⁾ Os: 渗透胁迫 osmotic stress; Ψ_L : 水势 water potential; RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; O_2^- : 超氧离子 superoxide (the amount in per milligram protein); MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde (the amount in per milligram protein); SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase; CAT: 过氧化氢酶活性 activity of catalase; POD: 过氧化物酶活性 activity of peroxidase; GSH: 谷胱甘肽含量 content of glutathione; AsA: 抗坏血酸含量 content of ascorbic acid.

2.2 在渗透胁迫条件下不同花生品种生理指标间的数学模型、弹性系数及边际量

2.2.1 水势对 RPMP、MDA、 O_2^- 和 SOD 的数学模型、弹性系数及边际量

在渗透胁迫下不同品种花生的水势对 RPMP、MDA、 O_2^- 和 SOD 的数学模型用

$y = a + bx^2$ 进行拟合。水势对 RPMP、MDA、 O_2^- 和 SOD 的弹性系数(EP)虽然都大于 1(表 7),但水势与它们的相关系数均为负数。由于应用二次函数进行拟合,所以 EP 才为正值,而实际 $EP < 0$,处于水势对这些生理指标的负效应阶段。

白皮1号水势降低1%, RPMP增加13.57%; 泉花10号水势降低1%, RPMP增加14.37%; 汕油71水势降低1%, RPMP增加16.06%。由此可见,水势降低1%对透性的变化率影响因品种而不同,白皮1

号受影响最小,泉花10号次之,汕油71受影响最大。

水势对MDA和超氧离子的效应也都为 $EP < 1$, 处于负效应阶段。白皮1号受影响最小,泉花10号次之,汕油71受影响最大。

表4 在渗透胁迫条件下花生品种白皮1号生理指标之间的相关矩阵¹⁾

Table 4 Correlation matrix of physiological indices of variety BAIPYIHAO of peanut under osmotic stress¹⁾

指标 Items	Ψ_L	RPMP	O_2^-	MDA	SOD	CAT	POD	GSH	AsA
Ψ_L	1.00	-0.99**	-0.86**	-0.74**	-0.98**	-0.79**	0.51	0.23	0.23
RPMP		1.00	0.89**	0.75**	0.98**	0.82**	-0.44	-0.18	-0.17
O_2^-			1.00	0.95**	0.92**	0.98**	-0.13	0.06	-0.05
MDA				1.00	0.82**	0.94**	0.10	0.32	0.11
SOD					1.00	0.87**	-0.43	-0.17	-0.22
CAT						1.00	-0.05	0.10	0.04
POD							1.00	0.90**	0.81**
GSH								1.00	0.75**
AsA									1.00

¹⁾ Ψ_L : 水势 water potential; RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; O_2^- : 超氧离子 superoxide; MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde; SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase; CAT: 过氧化氢酶活性 activity of catalase; POD: 过氧化物酶活性 activity of peroxidase; GSH: 谷胱甘肽含量 content of glutathione; AsA: 抗坏血酸含量 content of ascorbic acid. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

表5 在渗透胁迫条件下花生品种泉花10号生理指标之间的相关矩阵¹⁾

Table 5 Correlation matrix of physiological indices of variety QUANHUASHIHAO of peanut under osmotic stress¹⁾

指标 Items	Ψ_L	RPMP	O_2^-	MDA	SOD	CAT	POD	GSH	AsA
Ψ_L	1.00	-0.97**	-0.97**	-0.86**	-0.90**	0.01	0.76**	0.61*	0.86**
RPMP		1.00	0.97**	0.94**	0.95**	0.22	-0.59*	-0.48	-0.83**
O_2^-			1.00	0.91**	0.93**	0.15	-0.65**	-0.51	-0.86**
MDA				1.00	0.95**	0.44	-0.37	-0.23	-0.83**
SOD					1.00	0.26	-0.44	-0.25	-0.87**
CAT						1.00	0.53*	0.38	0.04
POD							1.00	0.90*	0.61*
GSH								1.00	0.31
AsA									1.00

¹⁾ Ψ_L : 水势 water potential; RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; O_2^- : 超氧离子 superoxide; MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde; SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase; CAT: 过氧化氢酶活性 activity of catalase; POD: 过氧化物酶活性 activity of peroxidase; GSH: 谷胱甘肽含量 content of glutathione; AsA: 抗坏血酸含量 content of ascorbic acid. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

表6 在渗透胁迫条件下花生品种汕油71生理指标之间的相关矩阵¹⁾

Table 6 Correlation matrix of physiological indices of variety SHANYOUQISHIYI of peanut under osmotic stress¹⁾

指标 Items	Ψ_L	RPMP	O_2^-	MDA	SOD	CAT	POD	GSH	AsA
Ψ_L	1.00	-0.97**	-0.84**	-0.84**	-0.84**	0.80*	0.78**	0.68*	0.80**
RPMP		1.00	0.91**	0.92**	0.91**	0.81*	0.65*	0.60*	0.71**
O_2^-			1.00	0.98**	0.95**	0.64*	-0.45	-0.44	-0.45
MDA				1.00	0.95**	-0.61*	-0.42	-0.41	-0.42
SOD					1.00	-0.72*	-0.53*	-0.60*	-0.55**
CAT						1.00	0.71*	0.75*	0.85*
POD							1.00	0.93**	0.93*
GSH								1.00	0.90*
AsA									1.00

¹⁾ Ψ_L : 水势 water potential; RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; O_2^- : 超氧离子 superoxide; MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde; SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase; CAT: 过氧化氢酶活性 activity of catalase; POD: 过氧化物酶活性 activity of peroxidase; GSH: 谷胱甘肽含量 content of glutathione; AsA: 抗坏血酸含量 content of ascorbic acid. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

水势对 SOD 的效应虽然也属于 $EP < 1$, 处于负效应阶段, 但白皮 1 号受影响最大。水势降低 1%, SOD 活性增加 46.63%; 汕油 71 受影响最小, 水势降低 1%, SOD 活性增加 16.38%。

由表 7 中水势对 RPMP 的边际量可见, 在渗透胁迫下, 当其他条件不变时, 白皮 1 号每连续减少一个单位的水势值, RPMP 增加 308.686; 泉花 10 号和汕油 71 RPMP 增加较大, 分别为 385.182 和 439.289。水势对 MDA 和 O_2^- 的边际量也有类似的趋势。

由水势对 SOD 的边际量分析可见(表 7), 当其他条件不变时, 白皮 1 号每连续减少一个单位的水势值, SOD 增加 4 403.239; 泉花 10 号和汕油 71 的 SOD 增加较小, 分别为 1 175.317 和 937.090。

2.2.2 SOD 对 RPMP、MDA 和超氧离子的数学模型、弹性系数及边际量 在渗透胁迫下不同品种花生 SOD 活性对质膜相对透性、MDA 和超氧离子的数学模型用 $y = a + bx$ 进行拟合。表 8 结果表明, SOD 对 RPMP 的弹性系数皆小于 1, 属于 $0 < EP < 1$, 处于 SOD 活性对 RPMP 效应的递减阶段。白皮 1 号的 SOD 活性对 RPMP 的效应较小, SOD 活性增加 1%, RPMP 增加 0.28%; 泉花 10 号和汕油 71 的效应为 0.73% 和 0.74%, 影响较大。

SOD 对 MDA 的弹性系数因品种而不同, 白皮 1 号为 $0 < EP < 1$, 处于 SOD 活性对 MDA 效应的递减

阶段。SOD 活性增加 1%, MDA 仅增加 0.09%。泉花 10 号和汕油 71 为 $EP > 1$, 处于 SOD 活性对 MDA 效应的递增阶段, SOD 活性增加 1%, MDA 分别增加 1.97% 和 2.43%。

SOD 对超氧离子的弹性系数也均小于 1, 属于 $0 < EP < 1$, 处于 SOD 活性对超氧离子效应的递减阶段。白皮 1 号的 SOD 活性对超氧离子的效应较小, SOD 活性增加 1%, 超氧离子增加 0.05%; 对泉花 10 号和汕油 71 的效应为 0.23% 和 0.23%, 影响较大。

由表 8 中 SOD 对 RPMP 的边际量可见, 当其他条件不变时, 白皮 1 号幼叶细胞每连续增加一个单位的 SOD, RPMP 增加 0.067; 泉花 10 号和汕油 71 RPMP 增加较大, 分别为 0.286 和 0.354。

由 SOD 对 MDA 的边际量可见, 白皮 1 号每连续增加一个单位的 SOD, MDA 增加 0.047; 泉花 10 号和汕油 71 增加幅度很大, 分别为 2.073 和 3.632。

SOD 对超氧离子的边际量也有类似的趋势, 但品种间差别较小。

2.2.3 超氧离子对 RPMP 和 MDA 的数学模型、弹性系数及边际量 在渗透胁迫下不同品种花生超氧离子对 RPMP 和 MDA 的数学模型用 $y = a + bx$ 进行拟合。表 9 结果表明, 超氧离子对 RPMP 的弹性系数皆小于 1, 属于 $0 < EP < 1$, 处于超氧离子对 RPMP 效应的递减阶段。白皮 1 号的超氧离子对 RPMP 的效应

表 7 在渗透胁迫条件下不同花生品种叶片水势对质膜相对透性、MDA、超氧离子和 SOD 的数学模型、弹性系数及边际量¹⁾
Table 7 Water potential on the mathematics model, productive elasticities and marginal yields of RPMP, MDA, O_2^- and SOD of peanut varieties under osmotic stress¹⁾

项目 ¹⁾ Items ¹⁾	品种 Varieties	数学模型 Mathematics model	相关系数 Correlation coefficient	$p^2)$	弹性系数 Productive elasticities	边际量 Marginal yields
RPMP	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = 7.22 + 13.57x^2$	-0.989	0.000	13.57	-308.686
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = 10.13 + 14.37x^2$	-0.966	0.000	14.37	-385.182
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = 8.51 + 16.06x^2$	-0.974	0.000	16.06	-439.289
MDA	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = 28.80 + 18.47x^2$	-0.736	0.002	18.47	-919.001
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = 34.05 + 32.97x^2$	-0.855	0.000	32.97	-2 371.658
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = 38.00 + 41.43x^2$	-0.844	0.000	41.43	-3 543.025
O_2^-	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = 2.85 + 2.19x^2$	-0.864	0.000	2.19	-11.707
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = 3.15 + 4.05x^2$	-0.970	0.000	4.05	-31.770
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = 6.33 + 3.91x^2$	-0.840	0.000	3.91	-41.545
SOD	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = 41.21 + 46.63x^2$	-0.982	0.000	46.63	-4 403.239
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = 49.78 + 17.19x^2$	-0.903	0.000	17.19	-1 175.317
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = 40.12 + 16.38x^2$	-0.841	0.000	16.38	-937.090

¹⁾ RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde; O_2^- : 超氧离子 superoxide; SOD: 超氧化物歧化酶活性 activity of superoxide dismutase. ²⁾ $P < 0.01$

表 8 在渗透胁迫条件下不同花生品种 SOD 对质膜相对透性、MDA 和超氧离子的数学模型、弹性系数及边际量¹⁾Table 8 SOD activity on the mathematics model, productive elasticities and marginal yields of RPMP, MDA and O₂⁻ of peanut varieties under osmotic stress¹⁾

项目 ¹⁾ Items ¹⁾	品种 Varieties	数学模型 Mathematics model	相关系数 Correlation coefficient	P ²⁾	弹性系数 Productive elasticities	边际量 Marginal yields
RPMP	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = -3.86 + 0.28x$	0.979	0.000	0.28	0.067
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = -24.03 + 0.73x$	0.955	0.000	0.73	0.286
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = -16.16 + 0.74x$	0.913	0.000	0.74	0.354
MDA	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = -9.64 + 0.09x$	0.819	0.000	0.09	0.047
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = -65.06 + 1.97x$	0.950	0.000	1.97	2.073
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = -57.67 + 2.43x$	0.952	0.000	2.43	3.632
O ₂ ⁻	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = -0.43 + 0.05x$	0.924	0.000	0.05	0.028
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = -5.93 + 0.20x$	0.935	0.000	0.20	0.023
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = -2.66 + 0.23x$	0.949	0.000	0.23	0.043

¹⁾ RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde; O₂⁻: 超氧离子 superoxide.

²⁾ P < 0.01

表 9 在渗透胁迫条件下不同花生品种超氧离子对质膜相对透性和 MDA 的数学模型、弹性系数及边际量¹⁾Table 9 Superoxides on the mathematics model, productive elasticities and marginal yields of RPMP and MDA of peanut varieties under osmotic stress¹⁾

项目 ¹⁾ Items ¹⁾	品种 Varieties	数学模型 Mathematics model	相关系数 Correlation coefficient	P ²⁾	弹性系数 Productive elasticities	边际量 Marginal yields
RPMP	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = 9.53 + 0.39x$	0.885	0.000	0.39	1.660
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = 12.44 + 0.19x$	0.971	0.000	0.19	0.649
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = 9.43 + 0.13x$	0.909	0.000	0.13	0.335
MDA	白皮 1 号 BAIPYIHAO	$y = 20.34 + 0.87x$	0.949	0.000	0.87	8.098
	泉花 10 号 QUANHUASHIHAO	$y = 37.38 + 0.46x$	0.911	0.000	0.46	4.218
	汕油 71 SHANYOUQISHIYI	$y = 23.98 + 0.45x$	0.980	0.000	0.45	3.622

¹⁾ RPMP: 质膜相对透性 relative plasma membrane permeability; MDA: 丙二醛含量 content of malonic dialdehyde. ²⁾ P < 0.01

较大, 超氧离子增加 1%, RPMP 增加 0.39%; 对泉花 10 号和汕油 71 的效应为 0.19% 和 0.13%, 影响较小。

超氧离子对 MDA 的弹性系数也皆小于 1, 属于 $0 < EP < 1$, 处于超氧离子对 MDA 效应的递减阶段。白皮 1 号的超氧离子对 MDA 的效应较大, 超氧离子增加 1%, MDA 增加 0.87%; 对泉花 10 号和汕油 71 的效应为 0.46% 和 0.45%, 影响较小。

由表 9 中超氧离子对 RPMP 的边际量可见, 当其他条件不变时, 白皮 1 号幼叶细胞每连续增加一个单位的超氧离子, RPMP 增加 1.660; 泉花 10 号和汕油 71 RPMP 增加较小, 分别为 0.649 和 0.335。

由超氧离子对 MDA 的边际量可见, 当其他条件不变时, 白皮 1 号幼叶细胞每连续增加一个单位的超氧离子, MDA 增加 8.098。泉花 10 号和汕油 71 的 RPMP 增加较小, 分别为 4.218 和 3.622。

3 讨论

在渗透胁迫下, 花生幼叶细胞水势降低引起质膜相对透性增加、超氧离子和 MDA 增生, 弹性系数分析表明, 处于水势对这些生理指标的负效应阶段, 这种影响因品种不同而异, 对较抗旱品种白皮 1 号影响较小。水势对 SOD 的效应虽然也处于负效应阶段, 但白皮 1 号受影响最大, 表明在渗透胁迫下, 抗旱品种的 SOD 活性提高较快, 抵御活性氧伤害的能力较强。

O₂⁻ 属活性氧类^[11-13], 对生物体具有很强的毒害作用, 已引起许多学者的重视^[12-20], O₂⁻ 可启动膜脂不饱和脂肪酸的过氧化作用, 而这一过程中又产生 O₂[·], 进一步增强过氧化作用。花生幼叶经渗透胁迫处理后, O₂⁻ 产生速率随水势降低而递增, O₂⁻ 破坏细

胞膜系统,产生MDA,并使细胞的质膜相对透性增加。MDA是膜脂过氧化作用的主要产物之一,具有很强的细胞毒性,对膜和细胞中的许多生物功能分子均有很强的破坏作用。因此,MDA的增加既是细胞质膜受损的结果,也是伤害的原因之一。

从 O_2^- 对质膜相对透性和MDA的弹性系数和边际量的分析结果中可看出, O_2^- 的增生使较抗旱品种白皮1号的质膜相对透性和MDA的增加较大。其原因可能是SOD活性在抗旱品种中提高较快,清除超氧离子能力较强,使细胞内的超氧离子数量减少,所以质膜相对透性和MDA与超氧离子的数量比值在抗旱品种中反而更高。

SOD能催化 O_2^- 发生歧化作用从而具有清除 O_2^- 的作用,水势降低使SOD活性增强。有研究认为CAT、POD、GSH和AsA与SOD同属细胞保护系统^[14-20],本文的结果表明SOD是这些细胞保护酶中最为重要的,与水势、质膜相对透性、超氧离子和MDA等生理指标之间的相关关系显著。而CAT、POD、GSH和AsA与这些生理指标之间的相关程度不一,保护细胞免遭活性氧伤害的作用不如SOD重要。

SOD活性对质膜相对透性、MDA和超氧离子增生的弹性系数和边际量的分析结果表明,SOD对上述生理指标的影响处于效应递减阶段,说明SOD在细胞受渗透胁迫损害时能有效清除超氧离子,防御膜脂过氧化作用,减轻质膜受损,减少MDA增生。SOD活性对质膜相对透性、MDA和超氧离子的影响因品种不同而异,抗旱品种白皮1号随SOD活性的提高,质膜相对透性、MDA和超氧离子降低较快。而不抗旱品种汕油71降低较慢。

综上所述,渗透胁迫引起花生幼叶细胞水势降低,导致质膜相对透性增加、超氧离子增生和MDA含量增生。SOD活性的提高清除了超氧离子,起到了细胞保护酶的作用。抗旱能力强的花生品种白皮1号表现出SOD活性提高较快的特点,因而在渗透胁迫下细胞受损较轻。在花生抗旱育种实践中,可把渗透胁迫处理后,细胞水势、超氧离子增生、MDA含量、质膜相对透性和SOD活性的变化作为抗旱能力筛选的参考生理指标。

参考文献:

- [1] Fridovich I. Superoxide dismutase [J]. *Ann Rev Biochem*, 1975, 44: 147-159.
- [2] 华东师范大学生物系植物生理教研室. 植物生理学实验指导(第二版)[M]. 北京:人民教育出版社,1980. 12-14,154-155.
- [3] 陈由强. 油茶种子老化进程中质膜伤害的研究[J]. *福建师范大学学报*,1992,8(2):78-82.
- [4] 王爱国,罗广华,邵从本,等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. *植物生理学报*,9(1):77-84.
- [5] 中山大学生物系生化教研室. 生化技术导论[M]. 北京:人民教育出版社,1978.
- [6] 罗广华,王爱国,郭俊彦. 几种外源因子对大豆幼苗SOD活性的影响[J]. *植物生理学报*,1990,16(3):239-244.
- [7] 张承烈,杨承德,梁厚果. 萝卜离体子叶衰老与膜脂过氧化的关系[J]. *植物生理学报*,1990,16(3):227-232.
- [8] X. H 波钦诺克. 荆家海,丁钟荣译. 植物生物化学分析方法[M]. 北京:科学出版社,1981. 115-117.
- [9] Arakawa N, Tsustsumi K, Sanceda N G. *et al.* A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline[J]. *Agric Biol Chem*, 1981, 45(5): 1289-1290.
- [10] 林思祖. 厚朴叶片衰老过程中SOD对叶绿素、蛋白质及质膜透性效应的定量研究[J]. *实验生物学报*,1996,26(4):325-329.
- [11] 陈由强. 活性氧[J]. *植物生理学通讯*,1984,(3):71.
- [12] 陈由强. 植物体内单线态氧的产生及其猝灭[J]. *植物生理学通讯*,1987,(1):1-5.
- [13] 王爱国,邵从本,罗广华,等. 活性氧对大豆下胚轴线粒体结构与功能的损伤[J]. *植物生理学报*,1990,16(1):13-18.
- [14] 蒋明义,荆家海,王韶唐. 渗透胁迫对水稻膜脂过氧化及体内保护酶系统的影响[J]. *植物生理学报*,1991,17(1):80-84.
- [15] 孙昌祖. 渗透胁迫对青杨叶片氧自由基伤害及膜脂过氧化的影响[J]. *林业科学*,1993,29(2):104-109.
- [16] Dhindsa R S, Dhindsa P P, Thorpe T A. Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase[J]. *J Exp Bot*, 1981, 32: 93-97.
- [17] 陈贻竹, B. 帕特森. 低温对植物叶片超氧化物歧化酶,过氧化氢酶和过氧化物酶水平的影响[J]. *植物生理学报*,1988,14(4): 323-328.
- [18] 陈由强,叶冰莹,朱锦懋,等. 渗透胁迫对花生(*Arachis hypogaea*)幼叶活性氧伤害和膜脂过氧化作用的影响[J]. *中国油料作物学报*,2000,22(1):53-56.
- [19] 叶冰莹,陈由强,朱锦懋. 水分胁迫对三种木麻黄小枝活性氧伤害和膜脂过氧化作用的影响[J]. *福建师范大学学报*,2000,16(1):76-79.
- [20] 陈由强,朱锦懋,叶冰莹. 水分胁迫对芒果(*Mangifera indica* L.)幼叶细胞活性氧伤害的影响[J]. *生命科学研究*,2000,4(1):60-64.

(责任编辑:惠红)