

多效唑对水分胁迫下苹果砧木八棱海棠光合及抗氧化酶活性等生理特性的影响

朱燕芳,王延秀,胡亚,贾旭梅,郭爱霞

(甘肃农业大学园艺学院,甘肃兰州730070)

摘要:以10叶龄八棱海棠(*Malus robusta* Rehd.)实生苗为试验材料,采用盆栽控水结合外源喷施多效唑(PBZ)的方法,探讨水分胁迫下八棱海棠对不同浓度外源多效唑(0、50、100、150、200 mg·L⁻¹)的响应特性,研究其光合、荧光及抗氧化酶活性的变化。结果表明:与对照(持续控水胁迫,不喷施任何溶液)相比,外源喷施PBZ有效减缓了水分胁迫下八棱海棠胞间CO₂浓度(Ci)、非光化学猝灭系数(NPQ)、过氧化物酶活性(POD)、相对电导率(REC)、脯氨酸(Pro)及丙二醛含量(MDA)的增加程度;并能控制其净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、最大光化学效率(Fv/Fm)、实际光化学效率(ΦPS II)、光化学猝灭系数(qP)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性的下降;其中对照组及各处理组NPQ分别升高了400.00%、348.28%、212.90%、153.13%、292.86%、266.67%,Pro分别升高了312.50%、246.67%、226.83%、129.55%、166.67%、189.58%,对照组和各处理组Pn分别下降了53.72%、50.00%、35.71%、22.28%、32.78%、31.52%,ΦPS II分别下降了51.22%、48.19%、35.00%、30.33%、41.25%、40.74%,处理组各指标变化程度均低于对照,且100 mg·L⁻¹处理组变化程度低于其他处理组,具有明显的浓度效应。干旱胁迫下,PBZ能够激活八棱海棠幼苗的防御系统及保护细胞膜系统,从而提高其耐旱性。采用隶属函数法和主成分分析对各项指标进行综合评价结果表明,100 mg·L⁻¹PBZ处理对缓解八棱海棠的水分胁迫效应最为显著。

关键词:水分胁迫;多效唑 八棱海棠;光合特性;抗氧化酶活性

中图分类号:S661.4 **文献标志码:**A

Effects of paclobutrazol on photosynthetic and antioxidant enzyme activities and other physiological characteristics of *malus robusta* rehd. under water stress

ZHU Yan-fang, WANG Yan-xiu, HU Ya, JIA Xu-mei, GUO Ai-xia

(Faculty of Agronomy Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract: The 10 leaf age seedling of *Malus robusta* Rehd. was used as a test material, and the pot experiments by controlling water content was applied in combination with spraying exogenous paclobutrazol (PBZ) to study the effects of different concentration exogenous paclobutrazol (0, 50, 100, 150, 200 mg·L⁻¹) on *Malus robusta* Rehd. under water stress, and explore the changes of the photosynthesis, fluorescence and physiological characteristics. The results showed that: compared with the control, exogenous application of PBZ effectively slowed the increasing range of the intercellular CO₂ concentration (Ci), non-photochemical quenching coefficient (NPQ), peroxidase activity (POD), electrolyte leakage (REC), Proline (Pro), and malondialdehyde (MDA) content of *Malus robusta* Rehd. under water stress, and alleviated the decreasing range of net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr), the maximum quantum yield of PSII (Fv/Fm), actual photochemical efficiency (ΦPS II), photochemical quenching coefficient (qP), the activity of catalase (CAT), the activity of superoxide dismutase (SOD). The NPQ in the control group and the treatment groups were increased by 400.00%, 348.28%, 212.90%, 153.13%, 292.86%, 266.67% respectively, the Pro respectively increased by 312.50%, 246.67%, 226.83%, 129.55%, 166.67%, 189.58%, and the Pn respectively decreased by 53.72%, 50.00%, 35.71%,

22.28%, 32.78%, 31.52%, with $\Phi\text{PS II}$ decreased by 51.22%, 48.19%, 35.00%, 30.33%, 41.25%, 40.74%. Also the change degree of each index in PBZ treatment groups was lower than that in the control group, and the change degree of each index in 100 mg · L⁻¹ PBZ treatment group was lower than that of the other PBZ treatment groups, which exhibited significant concentration-dependent effect. PBZ activate the defense system and protect the cell membrane system of seedlings under water stress, thus improving its drought tolerance. The comprehensive evaluation of the indicators using the fuzzy membership analysis and principal component analysis showed that the 100 mg · L⁻¹ PBZ treatment had the most significant effect on the water stress relief of *Malus robusta* Rehd.

Keywords: water stress; paclobutrazol; *Malus robusta* Rehd; photosynthetic characteristics; antioxidant enzyme activities

西北黄土高原地区海拔高、光照充足、昼夜温差大、生产集中,是我国苹果的最优生态区,但干旱已成为制约该地区苹果生长发育的重要因子^[1-2]。八棱海棠(*Malus robusta* Rehd.)因其抗寒抗旱、耐盐碱、与栽培品种亲和力和好等优点成为北方苹果产区的常用砧木^[3-4]。利用抗性砧木及应用外源物质提高苹果属植物水分利用效率,是解决苹果生产中干旱缺水问题的主要方法之一^[5]。

多效唑(PBZ)是一种三唑类抑制内源赤霉素合成的高效低毒植物生长调节剂,能够延缓植物生长,同时增强植物抗逆性^[6]。有研究表明,PBZ对飞燕草(*Consolida orientalis*)的花期、叶色、花色等有一定的影响^[7],且PBZ能延迟番茄中灰霉菌的生长,增强抗性^[8]。玉米、马铃薯等作物中,应用PBZ可降低叶片气孔开度、增加气孔阻力,减少植物体的蒸腾失水而提高植物叶片的相对含水量和抗旱性^[9-10]。在果树上应用PBZ的研究多集中于水分生理研究,韩振海等^[11]认为叶面喷施PBZ,可明显减少水分胁迫下果树叶片内游离脯氨酸的含量,增加叶片水势,提高叶片的抗逆性。关于苹果砧木在水分胁迫下,PBZ对光合参数和叶绿素荧光参数影响的研究报道较少。本试验探讨了水分胁迫下PBZ对八棱海棠光合特性、叶绿素荧光参数、抗氧化酶、膜脂过氧化、渗透调节物质含量的影响,以期明确PBZ提高植物耐旱性机理,同时为苹果栽培中应用外源物质提高抗旱性提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料及处理

试验于2015年3-9月在甘肃农业大学园艺学院避雨棚进行。2015年2月1日选取饱满一致的八棱海棠种子,蒸馏水浸泡12h后,在4℃进行湿沙处理。3月18日选露白较好、发芽一致的种子播入蛭石中,室温下培养,待幼苗长至2片真叶时,移入直径为15cm、装200g营养土(草炭:珍珠岩:蛭石

=3:1:1按体积比混合)的花盆中,每盆一株,统一管理。在育苗期间定期浇水、松土、除草。植株具10片真叶时,进行盆栽控水胁迫处理。采用持续称重法控制土壤含水量,每2天于傍晚称重并补充水分至最大田间持水量的45%~55%(质量含水量)。对照(CK)处理进行持续控水胁迫,不喷施任何溶液,试验设5个处理,分别用0mg·L⁻¹(C0,水溶液不含PBZ)、50mg·L⁻¹(C1)、100mg·L⁻¹(C2)、150mg·L⁻¹(C3)、200mg·L⁻¹(C4)的PBZ溶液进行喷施处理至滴水为止。每个处理30盆,重复3次,每3天取样并测定相应的指标。

1.2 试验方法

1.2.1 光合作用气体交换参数的测定 从胁迫处理当天开始,之后每隔3天,上午8:00,用光合仪(Li-6400,LI-COR公司,美国)测定生长一致的幼苗第8片真叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)。设定CO₂浓度为400 μmol · mol⁻¹,环境温度25℃,光强为800 μmol · m⁻² · s⁻¹。

1.2.2 光合作用荧光参数的测定 采用光合仪Li-6400测定荧光参数,叶片暗适应后,设置测量光饱和和后半夹好叶片,等待dF/dt绝对值<5时记录数据,计算非光化学猝灭系数(NPQ)、PSII的最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII的实际光化学效率(ΦPSII)、光化学猝灭系数(qP)等光合与荧光参数;测定重复5次。

1.2.3 生理生化指标的测定 SOD、POD、CAT活性采用李合生^[12]的方法测定;电解质渗漏率采用电导率法测定,MDA含量采用硫代巴比妥酸法测定^[12];脯氨酸含量采用磺基水杨酸法测定^[13]。

1.3 数据分析

试验数据应用Origin 9.0软件作图,运用SPSS 22.0软件进行数据差异显著性分析和主成分分析。统计分析采用单因素ANOVA的LSD比较差异的显著水平($\alpha = 0.05$)。在主成分分析前,用隶属函数法对数据进行转化。

采用模糊数学隶属函数法对各指标第 15 天数据进行分析,隶属函数的计算公式^[14-15]:

$$\text{隶属函数值: } U(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

反隶属函数值:

$$U(X_i) = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中, X_i 为指标测定值, X_{\min} 、 X_{\max} 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值, 如果 $(X_i - X_{\min})$ 为负值, 则采用(2)式。

2 结果与分析

2.1 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠叶片光合特性的影响

如图 1 所示, 随着水分胁迫的持续八棱海棠叶片的 P_n 、 G_s 、 Tr 呈显著下降的趋势, 而 C_i 呈上升趋势。

随着胁迫时间的延长, 对照组 P_n 下降程度较为明显; 处理 15 d 后, CK 及 C0、C1、C2、C3、C4 比第 0 天, 分别下降 53.72%、50.00%、35.71%、22.28%、32.78%、31.52%, 各处理组 P_n 下降幅度显著低于对照, C0 组与 CK 的下降幅度基本一致, 其中 C2 (100 mg · L⁻¹ PBZ) 处理显著低于其他处理及对照 (图 1A)。 G_s 、 Tr 的变化与 P_n 变化相似, 水分胁迫 15 d 后 CK 及 C0、C1、C2、C3、C4 的 G_s 分别下降了 60.71%、60.00%、40.06%、36.47%、45.24%、42.68% (图 1B), Tr 分别下降了 57.33%、53.42%、41.66%、33.78%、39.43%、43.84%, 其中 C2 处理后的两指标下降幅度均显著低于对照及其他处理 (图 1C)。处理 15 d 后, CK 及各处理的 C_i 分别上升了 37.12%、37.36%、34.24%、26.98%、36.08%、29.28%, 各处理组上升幅度均小于对照组, 其中处理组 C2 上升幅度最小, 且显著低于对照及其他处理组 (图 1D)。

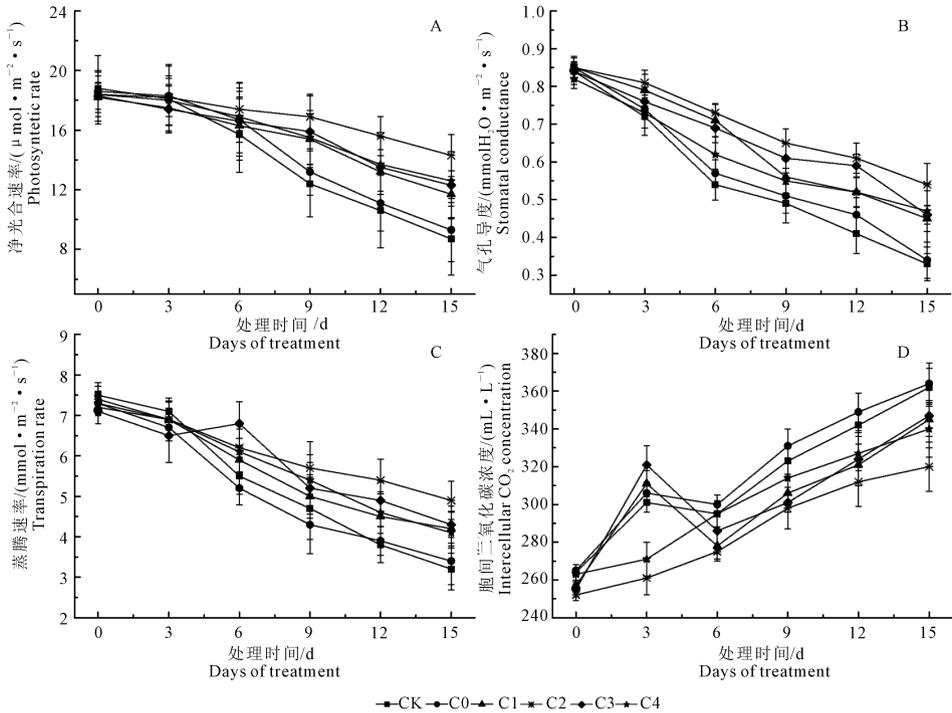


图 1 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠光合特性的影响

Fig.1 Effect of exogenous PBZ treatment on photosynthetic characteristics on *Malus robusta* Rehd. under water stress

2.2 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠荧光参数的影响

八棱海棠叶片的 Fv/Fm 呈缓慢下降的趋势, 说明植株遭受光抑制, CK 和 C0 持续下降, 而 C1、C2、C3、C4 处理组变化较为平缓, 表明 PBZ 处理能提高植株的抗旱能力 (图 2A)。随着水分胁迫时间的延长, 为维持光系统的稳定, 各处理组 NPQ 呈上升的趋势, 在 9~15 d, CK 和 C0 的 NPQ 明显高于其他处理组, 与第 0 天相比, 在第 15 天对照组及各处理组

NPQ 升高 400.00%、348.28%、212.90%、153.13%、292.86%、266.67%, 各处理组上升幅度低于 CK (图 2B)。各处理组 qP 均呈下降趋势, C2 组下降程度最小, 为 44.62%, 说明植株吸收的光能较多地用于光合作用, 从而避免光合机构的损坏 (图 2C)。各处理组的 $\Phi PS II$ 在 0~9 d, CK 及各处理后变化一致, 但在 9~15 d, 各处理组的数值均高于 CK。在处理第 15 天, CK、C0、C1、C2、C3、C4 分别比第 0 天下降 51.22%、48.19%、35.00%、30.33%、41.25%、40.74%,

说明 PBZ 处理后能提高 PSII 光合作用反应中心实

际光能捕捉效率(图 2D)。

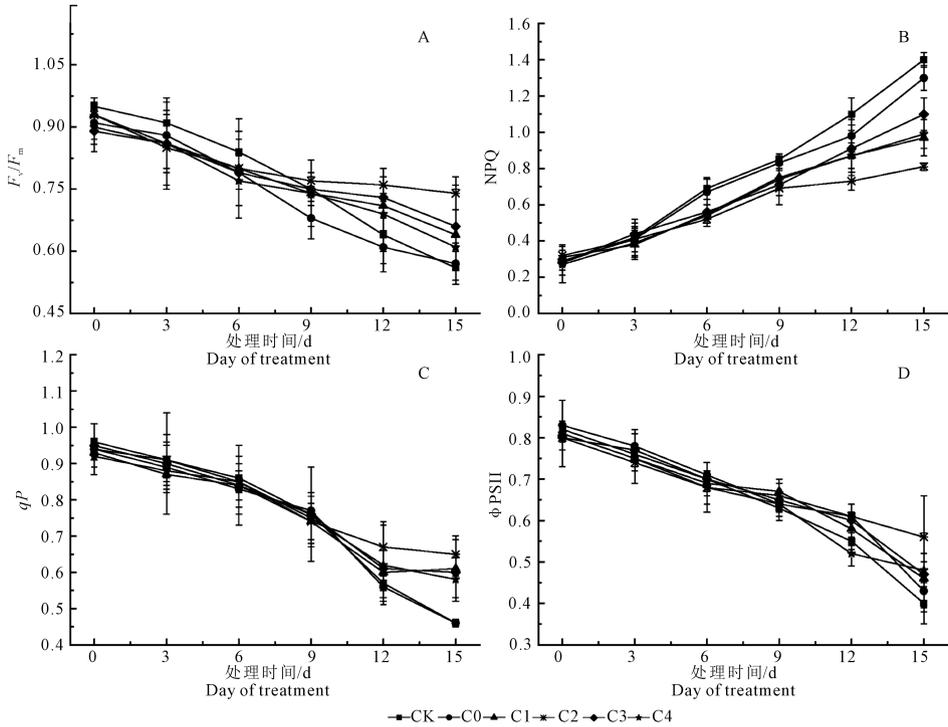


图 2 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠荧光参数的影响

Fig.2 Effect of exogenous PBZ treatment on fluorescence parameters on *Malus robusta* Rehd. under water stress

2.3 外源多效唑处理对水分胁迫下砧木抗氧化酶活性的影响

由图 3A 可知,随着水分胁迫时间的延长,八棱海棠叶片的 POD 酶活性逐渐升高,CAT 活性和 SOD 活性呈下降趋势。与第 0 天相比,处理 15 d 后,CK 及各处理组分别上升 141.94%、132.26%、84.85%、75.00%、73.53%、93.75%,且处理组的降低幅度低于对照组。CK、C0 与 C1 的 SOD 活性呈现显著下降;C2 在 0~3 d 短暂的升高,3~9 d 持续下降,9~12 d 则呈上升,12~15 d 显著下降,C3 在 0~6 d 持续上升,之后显著下降,C4 在 0~3 d 有短暂升高,之后持续下降。与第 0 天相比,处理 15 d 后,CK 与各处理组分别下降了 40.71%、39.36%、28.94%、21.66%、30.35%、31.96%,其中 C2 的下降幅度均低于对照及其他处理组(图 3B)。相比 SOD,CAT 活性下降呈现不同趋势。随着胁迫时间的延长,C2 的 CAT 显著高于 CK 及其他处理;CK 组的 CAT 活性在 0~3 d 显著下降,3~6 d 呈缓慢上升趋势,6~15 d 又呈显著下降的趋势,而 C1、C2、C3、C4 均呈缓慢下降趋势。与第 0 天相比,处理 15 d 后,CK 和处理组的 CAT 活性分别下降了 52.31%、48.06%、30.33%、31.34%、35.20%、34.65%,处理组与对照组之间存在显著差异(图 3C)。

2.4 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠渗透胁迫物质含量的影响

图 4 显示,随着水分胁迫的持续,八棱海棠叶片 Pro、REC、MDA 总体呈升高趋势。在图 4A 中,C2 组 MDA 含量显著低于 CK 和其他处理组,CK 和 C2 在前 6 天呈上升趋势,6~9 d 有短暂的下降,之后持续上升,C1 和 C4 在前 9 d 缓慢上升,9~12 d 下降,之后升高,C3 持续缓慢升高,在处理 15 d,CK 是 C2 的 1.27 倍。与第 0 天相比,CK 及各处理组分别上升 80.77%、60.71%、56.60%、37.04%、56.36%、66.67%。胁迫 3~15 d,CK 组的 Pro 显著高于其他处理组,而 C2 显著低于对照和其他处理组,在处理 15 d,CK 是 C2 的 1.63 倍,与第 0 天相比,CK 及各处理组分别上升 312.50%、246.67%、226.83%、129.55%、166.67%、189.58%(图 4B)。REC 的变化与 Pro 一致,即 C2 显著低于 CK 和其他处理组,在处理 15 d,CK 是 C2 的 1.42 倍,与第 0 天相比,CK 及各处理组分别上升 142.86%、113.33%、85.91%、53.85%、93.15%、81.58%(图 4C)。由此可知,八棱海棠 Pro、REC、MDA 的各个处理组的上升幅度明显低于对照,其中 C2 上升幅度最小。说明 PBZ 处理能有效缓解水分胁迫下渗透胁迫物质的上升。

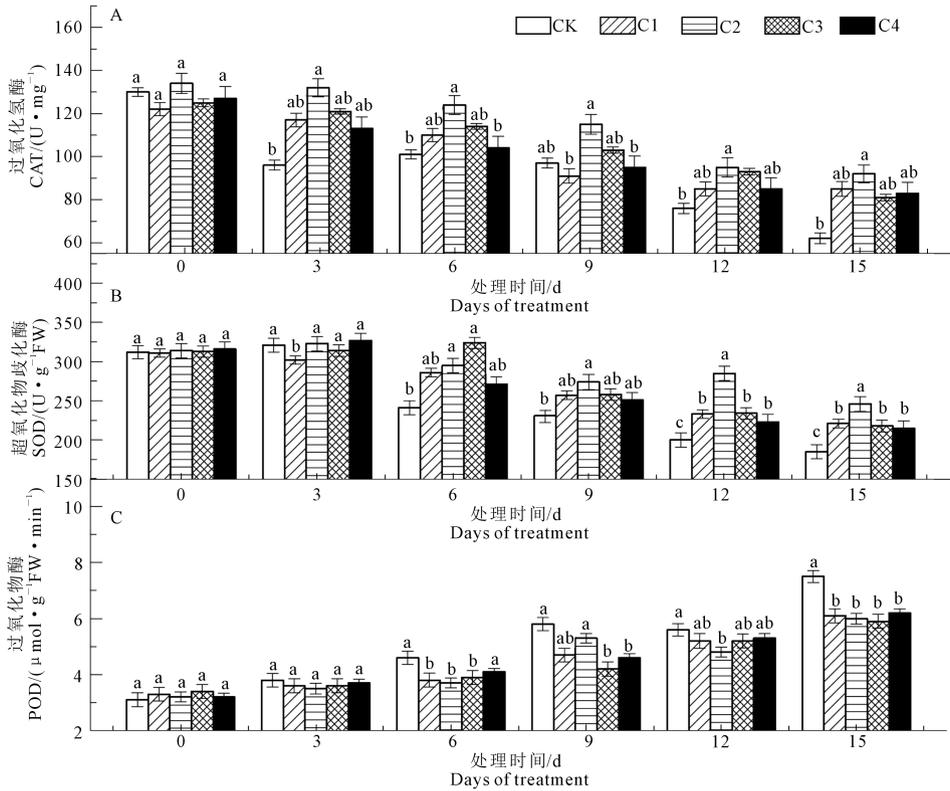


图 3 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effect of exogenous PBZ treatment on antioxidant enzyme activity on *Malus robusta* Rehd. under water stress

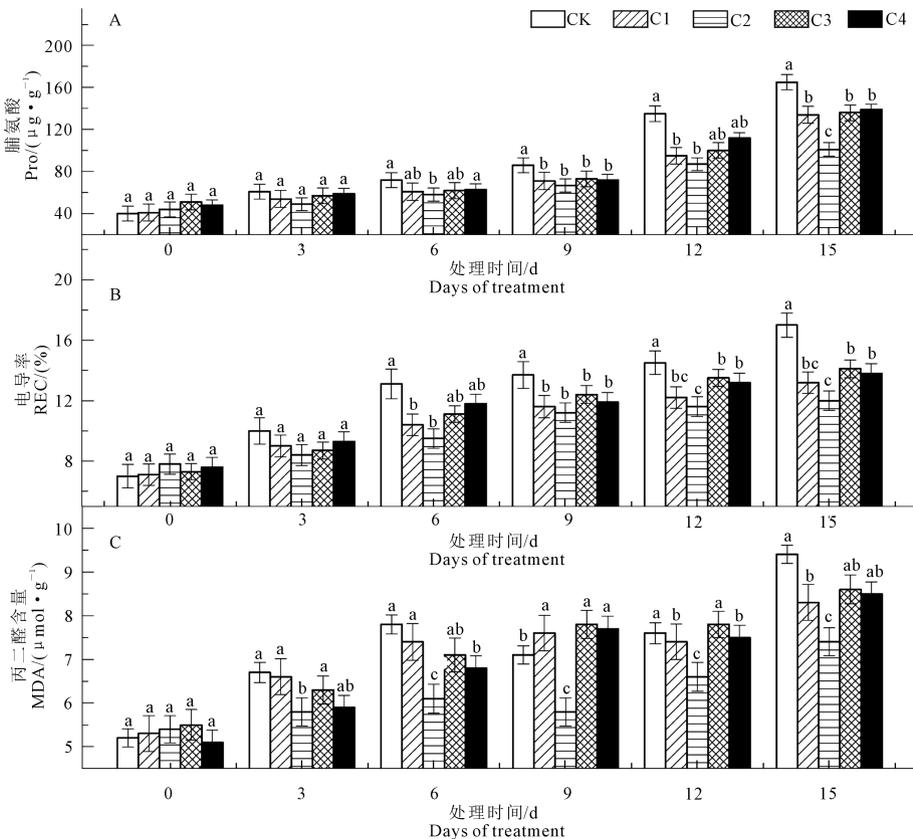


图 4 外源多效唑处理对水分胁迫下八棱海棠脯氨酸、电导率、丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effect of exogenous PBZ treatment on proline, relative electrical conductivity, malondialdehyde on *Malus robusta* Rehd. under water stress

2.5 不同浓度多效唑处理下八棱海棠抗旱能力的综合评价

2.5.1 利用模糊隶属函数分析方法对不同浓度多效唑处理下八棱海棠抗旱能力的综合评价 为了克服单个指标的局限性,全面反映外源多效唑对八

棱海棠幼苗的抗旱性影响,对各项指标进行隶属函数分析。根据其隶属函数平均值作为抗旱能力鉴定的标准进行排序。由表1可知,C2(100 mg · L⁻¹)处理下八棱海棠幼苗抗旱性最强。

表1 利用模糊隶属函数法对不同浓度多效唑处理下八棱海棠幼苗抗旱能力的综合评价

Table 1 Comprehensive evaluation of drought resistance of *Malus robusta* Rehd. under different paclobutrazol concentration treatments using fuzzy membership analysis

评价指标 Determination index	多效唑浓度 Paclobutrazol concentration/(mg · L ⁻¹)					
	0(CK)	0(C0)	50(C1)	100(C2)	150(C3)	200(C4)
净光合速率 Photosynthetic rate	0.000	0.107	0.536	1.000	0.643	0.696
气孔导度 Stomata conductance	0.000	0.045	0.545	0.955	1.000	0.636
蒸腾速率 Transpiration rate	0.000	0.118	0.588	1.000	0.647	0.529
胞间二氧化碳浓度 Carbon dioxide concentration	0.000	0.038	0.327	0.808	1.000	0.423
最大光化学效率 F_v/F_m	0.000	0.056	0.444	1.000	0.556	0.278
实际光化学效率 Φ_{PSII}	0.000	0.188	0.375	1.000	0.438	0.500
非光化学猝灭系数 NPQ	0.000	0.169	0.729	1.000	0.508	0.695
光化学猝灭系数 qP	0.000	0.053	0.789	1.000	0.737	0.632
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	0.000	0.098	0.590	1.000	0.541	0.122
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	1.000	0.813	0.125	0.063	0.000	3.875
过氧化氢酶活性 Catalase activity	0.000	0.167	0.767	1.000	0.633	0.700
丙二醛含量 Malondialdehyde	0.000	0.200	0.550	1.000	0.400	0.450
电导率 Relative electrical conductivity	0.000	0.200	0.760	1.000	0.580	0.640
脯氨酸 Proline	0.000	0.141	0.484	1.000	0.453	0.406
隶属函数均值 Mean value of the membership function	0.071	0.165	0.544	0.916	0.581	0.756
排序 Sort	6	5	4	1	3	2

2.5.2 利用主成分分析方法对不同浓度多效唑处理下八棱海棠抗旱能力的综合评价 水分胁迫下,不同浓度 PBZ 处理,对八棱海棠幼苗叶片 14 个指标的数据经隶属函数转化后进行主成分分析(图 5、表 2~4)。由表 2 和图 5 可知,从 14 个主成分中提取特征值大于 1 的两个主成分,其累积贡献率达 93.869%,能够较好地代表数据所反映的信息。由表 3 可以看出,第一主成分对 14 个变量指标的信息提取充分。将上述 2 个主成分的得分值代入综合评价函数,计算不同浓度 PBZ 处理的综合得分,综合指数的得分越高,说明该处理能有效提高八棱海棠抗旱性。从表 4 可知,C2 浓度处理下,八棱海棠幼苗抗旱性最强,这与模糊隶属函数分析法结果一致。

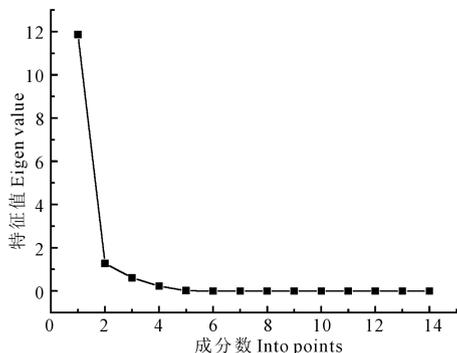


图5 主成分分析碎石图

Fig. 5 The principal component analysis scree plot

表2 主成分列表及方差贡献率

Table 2 List of principle components, percentage of variance, cumulative percentage

主成分 Component	特征根 Eigenvalue	方差贡献率/% Percentage of variance	累积方差贡献率/% Cumulative percentage
1	11.869	84.778	84.778
2	1.273	9.091	93.869

3 讨论

逆境下植物光合速率下降,同化产物减少^[16-17]。干旱胁迫对植物光合作用的抑制存在气孔限制和非气孔限制两种方式^[18]。只有当 C_i 降低和气孔限制值增大时,光合速率降低是由于气孔导度降低所引起的。反之,当叶片光合速率降低且 C_i 浓度升高,则光合作用的主要限制因素是非气孔因素^[19-20]。本试验表明不同浓度 PBZ 处理后,随着水分胁迫时间的延长,八棱海棠 P_n 、 G_s 和 Tr 均呈下降趋势,而 C_i 浓度总体呈上升趋势,说明光合作用下降主要受非气孔因素的影响,与牛铁泉等在苹果幼苗的研究结果一致^[21]。各处理组 P_n 、 G_s 、 Tr 的下降幅度显著低于对照组,同时 C_i 的上升幅度均小于对照组,说明 PBZ 有效缓解了 P_n 、 G_s 、 Tr 的降低,以及

C_i 的升高,此结论与冯立娟等在大丽花中的研究结果一致^[22],同时 PBZ 可能是通过调节植株光合系

统,减缓各光合指标在逆境下的受抑制程度,使植株能更好适应逆境胁迫,以此来增强植株的抗旱性。

表 3 因子负荷矩阵和得分系数矩阵

Table 3 Component matrix and score coefficient matrix

项目 Item	因子载荷 1 Factor loading 1	得分系数 1 Score coefficient 1	因子载荷 2 Factor loading 2	得分系数 2 Score coefficient 2
净光合速率 Photosynthetic rate	0.975	0.082	0.205	0.161
气孔导度 Stomata conductance	0.918	0.077	0.033	0.026
蒸腾速率 Transpiration rate	0.999	0.084	0.014	0.011
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	0.837	0.071	-0.097	-0.076
最大光化学效率 F_v/F_m	0.970	0.082	-0.195	-0.153
实际光化学效率 $\Phi PSII$	0.951	0.080	0.090	0.071
非光化学猝灭系数 NPQ	0.958	0.081	0.207	0.163
光化学猝灭系数 qP	0.973	0.082	0.061	0.048
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	0.918	0.077	-0.377	-0.296
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	-0.213	-0.018	0.972	0.764
过氧化氢酶活性 Catalase activity	0.972	0.082	0.160	0.126
丙二醛含量 Malondialdehyde	0.962	0.081	0.007	0.006
电导率 Relative electrical conductivity	0.974	0.082	0.115	0.090
脯氨酸 Proline	0.979	0.082	-0.041	-0.032

表 4 利用主成分分析法对不同浓度多效唑处理下八棱海棠幼苗抗旱能力的综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of drought resistance of *Malus robusta* Rehd. under different paclobutrazol concentration treatments using principal component analysis

处理 Treatment	F1 Score of PC1	F2 Score of PC2	F 综合 General score	排序 Sort
CK	-1.302	-0.363	-113.398	6
C0	-0.963	-0.286	-87.223	5
C1	0.313	-0.340	20.447	4
C2	1.449	-0.401	115.743	1
C3	0.405	-0.637	36.729	2
C4	0.098	2.027	27.702	3

前人研究表明叶绿素荧光参数会响应非气孔限制^[23]。本试验中,八棱海棠叶片的 F_v/F_m 、 qP 、 $\Phi PS II$ 均降低,表明随着水分胁迫时间的延长,植物色素可能受到了不同程度的破坏,使得电子转换效率下降,同时植物吸收的光能用于光化学反应的比例下降,而 NPQ 显著上升,则表明植物散热能力增强,是植物自我保护的一种机制,这与 Mohammed Mouradi 等在紫花苜蓿中研究的结果类似^[24]。PBZ 处理后其 F_v/F_m 、 qP 、 $\Phi PS II$ 较 CK 明显提高,各处理组的下降幅度显著低于 CK,同时 NPQ 的上升幅度低于 CK,表明 PBZ 缓解了叶绿素荧光参数的降低幅度,减轻其胁迫损伤程度,同时提高了砧木对胁迫的适应能力,这一结果与余凯凯等在马铃薯中的研究结果一致^[25]。Farzad 等也证实 qP 下降幅度

越小,表明植物越抗旱^[26]。其中 C2 处理组,即 100 mg · L⁻¹ PBZ,叶绿素荧光参数的下降和上升幅度最小,也可反映此浓度下,能及时耗散光合系统中的过剩光能,从而保护 PS II 反应中心免受因吸收过多光能而引起的光氧化伤害^[27]。

超氧化物歧化酶(SOD)是一种清除超氧阴离子自由基的酶,它催化超氧阴离子自由基与氢离子反应产生 H₂O₂ 和 O₂,H₂O₂ 可由过氧化氢酶进一步分解或被过氧化物酶利用^[28]。POD 和 CAT 是植物体中最重要的消除自由基的酶,POD 和 CAT 活性高低可反映出植物对干旱的抵御能力大小^[29]。本试验中随着水分胁迫时间的延长,各处理组 CAT 和 SOD 总体呈下降趋势,说明水分胁迫下八棱海棠活性酶系统遭到破坏。而 POD 酶活性则逐渐升高,表明 PBZ 处理提高了八棱海棠幼苗的活性氧清除能力。相对而言,PBZ 处理以后 SOD、CAT 下降幅度及 POD 上升幅度均低于对照组,说明 PBZ 处理在很大程度上缓解了水分胁迫对八棱海棠抗氧化系统的损伤。

水分胁迫下,植物膜系统遭到破坏,膜内大量的物质外渗,导致植物相对电导率的急剧上升。因此,电导率作为膜透性高低的指标,可用来描述植物抗旱性的强弱^[30]。本研究表明,水分胁迫下八棱海棠叶片相对电导率大幅上升,经 PBZ 处理的植株其相对电导率上升幅度显著低于对照组,表明 PBZ 处理能够有效缓解水分胁迫对膜系统造成的破坏,这与 Paul 等研究结果一致^[31]。游离脯氨酸是一种渗透调节物质,干旱胁迫条件下植物体内会大量积

累游离脯氨酸^[32]。本试验中,各个处理组 Pro 随处理时间均逐渐升高,说明脯氨酸的积累是干旱胁迫引起的应答反应^[33],MDA 与 Pro 的变化趋势一致,说明干旱胁迫下膜系统有一定程度的破坏^[34]。但 PBZ 处理后的 REC、Pro 和 MDA 的上升幅度总体显著低于对照,表明外源 PBZ 处理能提高或增强相关抗逆生理基础,即提高了渗透调节能力。其中 100 mg · L⁻¹ PBZ 处理下三个指标的上升幅度最小,说明此浓度下对于渗透胁迫物质的上升效果最佳。

通过比较不同指标的变化,反映不同浓度的 PBZ 对于植株抗旱性的提高,同时本试验选用模糊隶属函数分析法和主成分分析法对不同浓度 PBZ 处理下八棱海棠幼苗抗旱能力进行更进一步的综合评价^[35]。由于不同指标对评价体系的正负影响,采用隶属函数和反隶属函数法对各指标数据转化后进行主成分分析,使结果更为客观合理^[36]。由两种方法综合分析排序可知,C2(100 mg · L⁻¹)处理浓度最能有效提高八棱海棠的抗旱性,但 C3(150 mg · L⁻¹)和 C4(200 mg · L⁻¹)两处理浓度排序则相反,可能是两个浓度处理后,由于 PBZ 浓度偏高,浓度效应不明显。本试验中虽选出了 PBZ 最佳浓度,但 PBZ 从更深层次对植株的调节机理尚不明确,今后应从基因、蛋白、代谢等各个方面更透彻了解 PBZ 提高植株抗旱性的机理,以明确 PBZ 是通过调节植株光合和抗氧化酶系统中哪些相关的基因和蛋白以及代谢产物,为干旱地区果树栽培提供更有力的理论依据。

参考文献:

- [1] Zhang B-Q, Wu P-T, Zhao X-N, et al. A drought hazard assessment index based on the VIC - PDSI model and its application on the Loess Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 114(1): 125-138.
- [2] Ma S-C, Li F-M, Yang S-J, et al. Characteristics of flag leaf photosynthesis and root respiration of four historical winter wheat varieties released over recent decades in semi-arid Northwest China [J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 78: 1100-1105.
- [3] Ma L, Wu Y-X, He T-M. Effects of salt stress on anatomical structure of leaves of *Malus sieversii* and *Malus robusta* [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(8): 1777-1779, 1785.
- [4] Bai T-H, Li C-Y, Ma F-W, et al. Exogenous salicylic acid alleviates growth inhibition and oxidative stress induced by hypoxia stress in *Malus robusta* Rehd. [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2009, 28(4): 358-366.
- [5] Christopher J. Atkinson, Michaelangelo P, Anthony D. Webster, et al. Drought tolerance of apple rootstocks: production and partitioning of dry matter [J]. Plant and Soil, 1998, 206(2): 223-235.
- [6] Jaleel CA, Gopli R, Manivannan P, et al. Responses of antioxidant defense system of *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. to paclobutrazol treatment under salinity [J]. Acta Physiol Plant, 2007, 29(3): 205-209.
- [7] Mansuroglu S, Karaguzel O, Ortacesme V, et al. Effect of paclobutrazol on flowering, leaf and flower colour of *Consolida orientalis* [J]. Pakistan Journal of Botany, 2009, 41(5): 2323-2332.
- [8] Martinez J A, Navarro A, Ferna' ndez JA, et al. Using paclobutrazol to delay the growth of *Botrytis cinerea* isolated from *Chamelaucium uncinatum* [J]. Australasian Plant Pathology, 2007, 36: 39-45.
- [9] 杜彩艳,段宗颜,潘艳华,等.干旱胁迫对玉米苗期植株生长和保护酶活性的影响[J].干旱地区农业研究, 2015, 33(03): 124-129.
- [10] Mingjun Li, Genfa Zhang. Effects of paclobutrazol on the morphology, structure, and chlorophyll content of regenerated plantlets of Maize [J]. Israel Journal of Plant Sciences, 1999, 47(2): 85-88.
- [11] 韩振海,王倩.我国果树营养研究的现状和展望—文献述评 [J]. 园艺学报, 1995, 22(02): 138-146.
- [12] 李合生. 植物生理学及生物化学试验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [13] 郝建军,唐宗利.植物生理学实验技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] 王志泰,马瑞,马彦军,等.利用隶属函数法分析胡枝子抗旱性 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(09): 119-123.
- [15] 廖伟彪,肖洪浪,张美玲,等.4种藤本月季抗旱性综合评价 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(03): 546-551.
- [16] 何海军,寇思荣,王晓娟.干旱胁迫对不同株型玉米光合特性及产量性状的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(03): 63-66+74.
- [17] Liu Z-X, Bie Z-L, Huang Y, et al. Rootstocks improve cucumber photosynthesis through nitrogen metabolism regulation under salt stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(7): 2259-2267.
- [18] Kobra Maghsoudi, Yahya Emam, Mohammad Pessaraki. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions [J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(7): 1001-1015.
- [19] Farquhar GD, Sharke T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [20] 甄伟,张福垠.弱光对黄瓜功能叶片光合特性及超微结构的影响 [J]. 园艺学报, 2000, 27(4): 290-292.
- [21] 牛铁泉,田给林,薛仿正,等.半根及半根交替水分胁迫对苹果幼苗光合作用的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1463-1468.
- [22] 冯立娟,苑兆和,尹燕雷,等.多效唑对大丽花叶片光合特性和超微结构的影响 [J]. 草业学报, 2014, (04): 114-121.
- [23] Yan S T, Li X D, Li W D, et al. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence response to low sink demand of tubers and roots in *Dahlia pinnata*, source leaves [J]. Biologia Plantarum, 2011, 55(1): 83-89.
- [24] Mohammed M, Abdelaziz B, Mohamed F, et al. Seed osmopriming improves plant growth, nodulation, chlorophyll fluorescence

- and nutrient uptake in alfalfa (*Medicago sativa* L.)-rhizobia symbiosis under drought stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 213:232-242.
- [25] 余凯凯, 宋喜娥, 高虹, 等. 不同施肥水平下多效唑对马铃薯光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(01): 154-163.
- [26] Farzad P, Mohammad N, Hamid Reza T M, et al. Effects of Drought Stress on Chlorophyll Fluorescence Parameters, Chlorophyll Content and Grain Yield of Wheat Cultivars[J]. *Journal of Biological Sciences*, 2007, 76:841.
- [27] Parinaz RB, Masashi M, Kenji O. Relationships between the photochemical reflectance index (PRI) and chlorophyll fluorescence parameters and plant pigment indices at different leaf growth stages[J]. *Photosynthesis Research*, 2012, 1131:261-271.
- [28] 张静, 赵明亮, 邹志荣. 不同苹果砧木组培苗抗旱性的比较研究[J]. *果树学报*, 2013, 30(01): 88-93.
- [29] 郭振飞, 卢少云. 草坪草逆境生理研究进展[J]. *草业学报*, 2013, 21(4):743-751.
- [30] VanKO, Snel JFH. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology [J]. *Photosynthesis Research*, 1990, 25:147-150.
- [31] Paul E V, Robert E. Praline accumulation in maize primary roots at low water potentials, metabolic source of increased praline deposition in the elongation zone [J]. *Plant Physiology*, 1999, 119: 1349-1360.
- [32] 卢少云, 陈斯平, 陈斯曼, 等. 三种暖季型草坪草在干旱条件下脯氨酸含量和抗氧化酶活性的变化[J]. *园艺学报*, 2003, 30(3):303-306.
- [33] 董永华, 史吉平, 李广敏, 等. ABA 和 6-BA 对水分胁迫下小麦幼苗 CO₂ 同化作用的影响[J]. *作物学报*, 1997, 23(04): 501-504.
- [34] 黄建昌, 肖艳, 赵春香, 等. CPPU 对番木瓜干旱胁迫的保护作用[J]. *果树学报*, 2003, 20(03):211-213.
- [35] 刘科鹏, 黄春辉, 冷建华, 等. ‘金魁’猕猴桃果实品质的主成分分析与综合评价[J]. *果树学报*, 2012, 29(05):867-871.
- [36] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(03):141-147.

(上接第 177 页)

- [8] 董绪兵, 毕焕改, 刘业霞, 等. 黄瓜幼苗干旱-低温交叉适应与渗透调节的关系[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(2): 335-340.
- [9] 刘建新, 王金成, 王瑞娟, 等. 早盐交叉胁迫对燕麦幼苗生长和渗透调节物质的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 244-248.
- [10] 刘建新, 王金成, 王瑞娟, 等. 早盐交叉胁迫对燕麦幼苗叶片生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 24-28, 101.
- [11] Sui N, Liu X, Wang N, et al. Response of xanthophylls cycle and chloroplastic antioxidant enzymes to chilling stress in tomato over-expressing glycerol-3-phosphate acyltransferase gene [J]. *Photosynthetic*, 2007, 45(3): 447 - 454.
- [12] Sergiev I, Alexieva V, Karanov E. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants [J]. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 1997, 51(2): 121-124.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 182-261.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 68-77.
- [15] 王玲, 段晓宇, 唐敏, 等. 镧处理下大花蕙兰耐寒性生理指标的综合评价[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(8): 1177-1183.
- [16] 梁小红, 艾非凡, 钟天秀, 等. 多年生黑麦草对干旱-低温交叉适应的生理响应[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 163-170.
- [17] Janicka-Russak M, Kabała K, Wdowikowska A, et al. Response of plasma membrane H⁺-ATPase to low temperature in cucumber roots [J]. *Journal of Plant Research*, 2012, 125(2): 291-300.
- [18] Romanenko A S, Borovskii G B, Ukolova I V, et al. Subcellular localization of dehydrins in wheat plant seedlings subjected to low-temperature adaptation [J]. *Biochemistry (Moscow) Supplement Series A: Membrane and Cell Biology*, 2010, 4(2): 162-170.