果 树 学 报 2021,38(9):1479-1490
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20210110

2,4-表油菜素内酯对盐碱胁迫下垂丝海棠光合及生理特性的影响

王晚霞,高立杨,张 瑞,赵 婷,张仲兴,王双成,王延秀*

(甘肃农业大学园艺学院,兰州 730070)

摘 要:【目的】探究外源2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide,EBR)对盐碱胁迫下苹果属幼苗的生理效应。**【方法】**以8叶龄垂丝海棠幼苗为材料,设置清水浇灌(CK1)、100 mmol·L^{-1}(50 mmol·L^{-1} NaCl+50 mmol·L^{-1} $NaHCO_3$)浓度的盐碱胁迫处理(CK2)、盐碱胁迫+0.05 mg·L^{-1} EBR喷施处理(T1)、盐碱胁迫+0.1 mg·L^{-1} EBR喷施处理(T2)、盐碱胁迫+0.2 mg·L^{-1}EBR喷施处理(T3)、盐碱胁迫+0.4 mg·L^{-1} EBR喷施处理(T4)、盐碱胁迫+0.6 mg·L^{-1}EBR喷施处理(T5)共7个处理,测定处理后不同时间叶片的相对电导率(relative electric conductivity,*REC*)、相对含水量(relative water content,*RWC*)、叶绿素含量、光合特性、荧光参数、抗氧化酶活性及Na^+、K^+含量并进行主成分分析。**【结果】**外源喷施2,4-表油菜素内酯可有效降低盐碱胁迫下垂丝海棠叶片*REC*、胞间二氧化碳浓度(C_i)和Na^+含量的升高幅度,以及*RWC*、叶绿素a(Chl a)含量、叶绿素b(Chl b)含量、叶绿素a+b(Chl a+b)含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)的下降幅度;初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、光化学淬灭系数(*qP*)、调节性能量耗散(*Y*(*NPQ*))、非调节性能量耗散(*Y*(*NO*))、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)活性、过氧化物酶(peroxidase,POD)活性均呈先升后降的趋势;T3处理下达到峰值。对21个指标进行主成分分析,提取特征值>1的3个主成分,累计方差贡献率达到98.482%。依据主成分得分排序,外源EBR对垂丝海棠盐碱胁迫缓解能力由高到低为:CK1>T3>T2>T4>T5>T1>CK2。**【结论】**0.2 mg·L^{-1}的外源EBR可更好改善盐碱胁迫下垂丝海棠的光合能力、提高抗氧化酶活性、增强生物膜的稳定性,从而起到缓解盐碱胁迫的作用。

关键词:垂丝海棠;2,4-表油菜素内酯;盐碱胁迫;光合特性;叶绿素荧光;Na^+和K^+;主成分分析

中图分类号:S661.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2021)09-1479-12

Effects of 2,4 epbrassinolide on photosynthetic and physiological characteristics of *Malusa halliana* under saline-alkali stress

WANG Wanxia, GAO Liyang, ZHANG Rui, ZHAO Ting, ZHANG Zhongxing, WANG Shuangcheng, WANG Yanxiu*

(*College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China*)

Abstract:【Objective**】**The Loess Plateau is the main producing regions of apple in Northwest China. Due to the abundant sunshine and the great diurnal temperature difference, the apple planting area in this region is constantly expanding. According to statistics, over 7.6 million hectares of China's cultivated land is salinized, accounting for one fifth of the total cultivated land, and the northwest inland area is more seriously salinized, accounting for more than 13 percent of the total salinized area. The effect of saline-alkali stress on physiological and biochemical characteristics of plants has become a hot topic in recent years. The combined saline-alkali stress can cause osmotic stress and ionic toxicity, change the pH in vacuoles and cytoplasm, increase the content of reactive oxygen species in plant cells, break the balance among ions, decrease osmotic regulation ability, and affect the photosynthetic performance and

收稿日期:2021-03-28 **接受日期:**2021-05-22

基金项目:国家自然科学基金(31960581)

作者简介:王晚霞,女,在读硕士研究生,主要从事果树栽培生理研究。E-mail:1907726119@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:wangxy@gsau.edu.cn

normal growth of plants. In this study, the effects of exogenous 2, 4-epbrassinolide (EBR) on photosynthesis and physiological characteristics of *Malus halliana* seedlings grown under saline-alkali stress were studied.【Methods】In this experiment, 8 leaf-old *M. halliana* seedlings were used as the experimental material, and 7 treatments were set up, including irrigation with fresh water (CK1), irrigation with 100 mmol · L^{-1} (50 mmol · L^{-1} NaCl+50 mmol · L^{-1} $NaHCO_3$) sodium salt solution (saline-alkali stress, or CK2), saline-alkali stress + 0.05 mg · L^{-1} EBR spraying (T1), saline-alkali stress + 0.1 mg · L^{-1} EBR spraying (T2), saline-alkali stress+ 0.2 mg · L^{-1} EBR spraying (T3), saline-alkali stress + 0.4 mg · L^{-1} EBR spraying (T4), and saline-alkali stress + 0.6 mg · L^{-1} EBR spraying. The treatments were conducted with 3 biological replicates each consisting of 10 seedlings. The membrane leakage or relative electricity conductivity (REC), relative water content, chlorophyll content, photosynthetic characteristics, fluorescence parameters, antioxidant enzyme activity and contents of Na^+ and K^+ in each treatment were determined and principal component analysis was conducted.【Results】Exogenous EBR could effectively reduce the increases in REC, intercellular carbon dioxide concentration (C_i) and Na^+ content in leaves of plants under saline-alkali stress. The relative water content, contents of chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), and chlorophyll a+b (Chl a+b), net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_S) and transpiration rate (T_r) of leaves were significantly decreased. The initial fluorescence (F_0), maximum fluorescence (F_m), photochemical quenching coefficient (*qp*), regulatory energy dissipation [*Y*(*NPQ*)], non-regulatory energy dissipation [*Y*(*NO*)], and activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) showed first increased and then decreased. The seedlings treated with 0.2 mg · L^{-1} EBR suffered the least damage under saline-alkali stress. Compared with CK2, the REC decreased by 9.90%, 16.96%, 25.05%, 16.78% and 11.12% in T1, T2, T3, T4 and T5, respectively, on the 9th day of stress, and relative water content in the leaves increased by 45.48%, 64.24%, 80.91%, 66.15% and 55.41%, respectively. The results indicated a concentration effect of EBR. The contents of Chl a, Chl b and Chl a+b were increased to different degrees by EBR treatments. P_n, G_S, and T_r in all the EBR treatments were significantly lower than that of CK1, but significantly higher than in CK2. The results indicated that exogenous EBR could alleviate the photosynthetic damage caused by salt-saline stress. With the increase in EBR concentration, activities of both POD and SOD increased at first and then decreased. The peak values were found in T3 treatment, indicating that T3 had a stronger antioxidant capacity than the other treatments. The content of Na^+ firstly decreased and then increased with the increase in EBR concentration, while the content of K^+ displayed an opposite pattern and was highest in T3 treatment, indicating that the treatment caused the least damage under salt-alkali stress. Principal component analysis showed that the eigenvalues of >1 were 17.242, 2.31 and 1.129, and the variance contribution rates were 82.105%, 10.999% and 5.378%, respectively. The cumulative variance contribution rate reached 98.482%. Based on principal component score sorting, the order from the least to most serious damage among treatments was CK1 > T3 > T2 > T4 > T5 > T1 > CK2.【Conclusion】EBR can alleviate salinity-alkalinity stress in *M. halliana* seedlings by maintaining the stability of antioxidant enzyme system and membrane integrity and reducing the absorption of Na^+. Application at 0.2 mg · L^{-1} has the best effect.

Key words: *Malusa halliana*; EBR; Saline-alkali stress; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence; Na^+ and K^+; Principal component analysis

我国是世界上最大的苹果生产国[1]。西北黄土高原产区是我国四大苹果产区之一，具有海拔高、光照充足、昼夜温差大等优势[2]，但该地区70%以上土壤为含NaCl与$NaHCO_3$的高pH盐碱土，导致苹果产量受到盐碱胁迫危害[3]。果树长期暴露在盐碱胁迫下会引起离子毒害，从而引起叶片的早衰、变黄、坏死等症状[4]，影响其光合潜能及正常生长，严重制约了当地苹果产业发展[5]。生产中常选用耐盐碱的优良砧木及外源物质处理来缓解盐碱胁迫[6]，因此，研究砧木耐盐性及筛选适宜缓解胁迫的外源物质对于盐碱地区的苹果生产具有重要意义。

油菜素内酯（brassinosteroids, BRs）是存在于植物中的甾醇类激素，可增强植物对环境胁迫的抵抗力[7]，能有效缓解胁迫对植株的损伤。2，4-表油菜素内酯（2，4-epibrassinolide, EBR）是作物上应用最多的BR化合物之一，其主要通过改变植物生理生化过程增强植物的抗逆性，如维持较高的叶绿素含量，减缓脂膜过氧化作用等[8-9]。Janeczko等[10]研究发现，在高温条件下外源EBR处理可明显增大无柄小叶榕净光合速率和气孔导度、降低蒸腾速率。胡文海等[11]研究发现，外源EBR处理改善了干旱胁迫下辣椒叶片PSⅡ受体侧的电子传递，减轻了干旱光抑制程度，对干旱胁迫下辣椒叶片光合机构和光合性能起到保护作用。吴杨等[12]指出，施加外源EBR提高了抗氧化酶活性和脯氨酸及叶绿素含量，降低了活性氧（reactive oxygen species，ROS）的积累，进而增强大豆幼苗耐盐碱胁迫的能力。寇江涛[13]在燕麦幼苗的研究中发现，外源EBR能够缓解NaCl胁迫下Na^+和Cl^-对燕麦幼苗所造成的离子毒害作用，对维持燕麦幼苗体内的离子稳态平衡具有正向调控作用。此外，外源喷施BRs还可以促进植物内源BRs的合成，进而提高植物耐盐碱性[14]。近些年，外源BRs在增强果树抗病、抗盐碱方面的研究较少，且多以单一中性盐或碱性盐研究为主，对于盐碱胁迫的研究更是少见。

垂丝海棠原产于甘肃河西走廊干旱、盐碱生境，是抗寒、耐旱、耐盐碱的苹果砧木资源[15]。笔者选用两年生7~8叶龄的垂丝海棠实生苗为试验材料，探讨垂丝海棠幼苗在外源喷施不同质量浓度EBR后，在盐碱胁迫下叶绿素、抗氧化酶及光合特性，筛选出缓解盐碱胁迫对垂丝海棠伤害的最适EBR质量浓度，以期为西北产区利用化学手段调控作物耐受性提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料及处理

试验于2020年7—10月在甘肃农业大学避雨棚（36°10′ N，103°34′ E）中进行，选取生长一致的垂丝海棠实生苗8叶龄幼苗（垂丝海棠种子来源于甘肃敦煌），移入0.6 kg盛装基质（质量分数20%蛭石，质量分数20%珍珠岩，质量分数60%泥炭）、质量为0.65 kg的花盆（内径12 cm，深30 cm）中，每盆1株，并置于甘肃农业大学园艺学院避雨棚中进行统一管理30 d，定期除草，浇水。选取210株长势一致的幼苗转移到Hoagland营养液的水培箱中，每箱培育10株幼苗，并用电动通气泵持续通氧，所有植株均处于相同的生长环境中。每5 d更换1次营养液，14 d后选择长势一致的垂丝海棠幼苗开始处理，每2 d进行1次EBR的喷施，于傍晚19:00进行，每株25 mL，共喷施3次，共设0.05（T1）、0.1（T2）、0.2（T3）、0.4（T4）、0.6 $mg\cdot L^{-1}$（T5）5个质量浓度，每个质量浓度30株，于最后1次喷施的第2天早上开始盐碱复合胁迫（NaCl和$NaHCO_3$按摩尔比1∶1混合配用）处理，根据本课题组先前的研究，选择100 $mmol\cdot L^{-1}$为胁迫处理浓度[6]，每处理30株。为了避免盐激反应，开始处理时以25 mmol递增，达到最终浓度后开始计算胁迫时间。设置相应对照CK1为未喷施+Hogland营养液正常生长；CK2为未喷施+100 $mmol\cdot L^{-1}$（50 $mmol\cdot L^{-1}$ NaCl+50 $mmol\cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$）盐碱胁迫处理，每个处理3次重复，每个重复10株幼苗。

1.2　测定指标及方法

1.2.1　*光合及叶绿素含量的测定*　分别于胁迫0、3、6、9 d，选取垂丝海棠的功能叶片，采用LI-6400（LI-COR，Lincoln，NE，USA）便携式光合仪于当日上午9:00开始测定植物气体交换参数，测定净光合速率（P_n）、蒸腾速率（T_r）、胞间CO_2浓度（C_i）、气孔导度（G_s），3次重复。光合仪系统控制叶片温度25 ℃，测定系统采用开放式气路，叶室内空气流量设定为500 $mL\cdot min^{-1}$，室内CO_2含量（φ）为（385±10）$\mu L\cdot L^{-1}$。

胁迫至9 d，采用IMAGING-PAM叶绿素荧光仪和ImagingWinGegE软件（Walz，Effeltrich，德国）测定初始荧光（F_0）、最大光化学效率（F_m）、PSⅡ最大光能转化率（F_v/F_m）、调节性能量耗散（$Y(NPQ)$）、非调节性能量耗散（$Y(NO)$）以及光化学猝灭系数（qP）。

分别于0、3、6、9 d采用叶绿素计（MinoltaSPAD-502ChloropyhllMeter,Japan）测定叶绿素a（Chl a）和叶绿素b（Chl b）含量，二者之比为叶绿素a/b（Chl a/b），二者之和为叶绿素a+b（Chl a+b）。

1.2.2 相对电导率的测定 相对电导率（relative electric conductivity，*REC*）采用电导法测定[16]。

1.2.3 叶片相对含水量的测定 测定时间同1.2.1，首先将垂丝海棠叶片从植株上分离下来，称取质量后装入叠好的纸袋，105 ℃下杀青1 h，然后在80 ℃下烘干至恒质量后再进行称质量，根据计算公式计算：叶片相对含水量（water content，*WC*）/%=（第一次称质量−第二次称质量）/叶片鲜质量×100。

1.2.4 SOD、POD酶活性测定 测定时间同1.2.1，超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）测定采用氮蓝四唑光化还原法[16]，过氧化物酶（peroxidase，POD）活性的测定采用愈创木酚法[17]。

1.2.5 Na^+、K^+含量的测定 Na^+、K^+含量的测定采用火焰分光光度计法。

1.3 数据处理

运用Excel 2018整理统计数据，使用软件SPSS 22.0分析数据，使用软件Origin 2018作图，采用单因素ANOVA的Duncan法进行多重比较，差异显著水平为0.05（$p < 0.05$）。

2 结果与分析

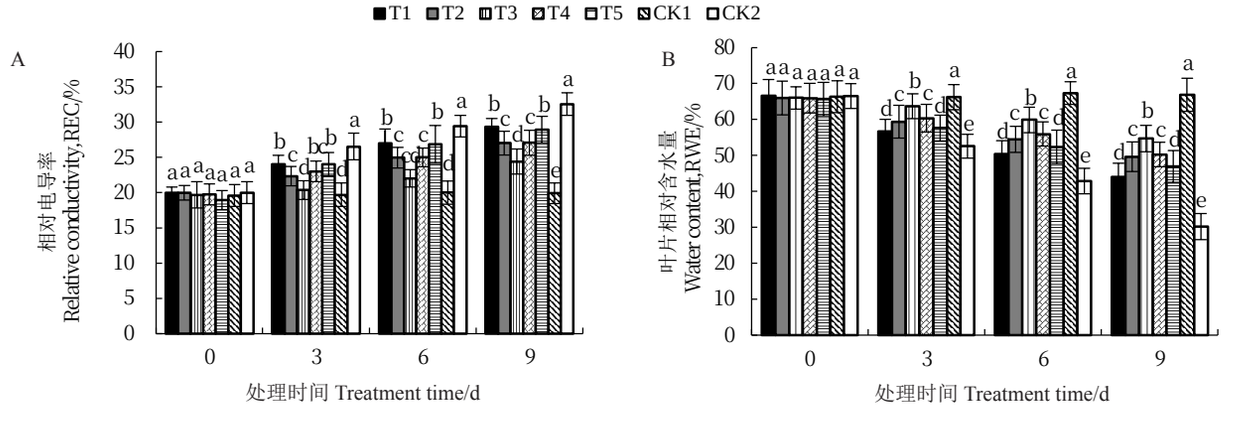
2.1 外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠叶片相对电导率及叶片相对含水量的影响

植物细胞膜的损伤程度的高低可用相对电导率来衡量。由图1-A可得，随着时间的延长，所有处理和CK2叶片*REC*呈逐渐上升趋势，CK1无明显变化；而随着EBR质量浓度的增加，垂丝海棠叶片*REC*呈先降后升的趋势，在T3处理降至最低。胁迫至第3天时，各处理下的*REC*显著升高；胁迫至第9天时，不同质量浓度处理的叶片*REC*显著高于CK1，且显著低于CK2，相比于CK2分别低了9.90%（T1）、16.96%（T2）、25.05%（T3）、16.78%（T4）和11.12%（T5）。由此可见，T3细胞膜的损害程度最小，即0.2 mg·L^{-1}EBR缓解盐碱胁迫对垂丝海棠伤害的效果最好。

植物供水能力和耐性的强弱可用叶片相对含水量（relative water content，*RWC*）来衡量。由图1-B可知，在盐碱胁迫下，随着时间的延长，所有处理和CK2的叶片*RWC*呈逐渐下降趋势。胁迫至第3天时，所有处理和CK2的叶片*RWC*均出现下降，随着EBR质量浓度的增加，叶片*RWC*呈先升后降的趋势；胁迫至第9天时，不同质量浓度处理的叶片*RWC*进一步下降，显著高于CK2，且显著低于CK1，分别比CK2高了45.48%（T1）、64.24%（T2）、80.91%（T3）、66.15%（T4）和55.41%（T5）。由此可得，盐碱胁迫对T3造成的伤害最小。

2.2 外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗光合色素含量的影响

叶绿素含量的高低在一定程度上决定了光合能力的强弱。由图2-A可得，在盐碱胁迫下，随着时间延长，所有处理和CK2的Chl a含量均呈逐渐下降趋势，CK1无明显变化；而随着EBR质量浓度的增加，各处理垂丝海棠叶片Chl a含量呈先升后降的趋势，



不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Different small letters indicate significant difference at $p < 0.05$. The same below.

图1 外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠叶片相对电导率及叶片相对含水量的影响

Fig. 1 Effect of exogenous EBR on the relative electricity conductivity (REC) and relative water content in *Malus halliana* Koehne seedlings under saline-alkali stress

在T3处理达到峰值。胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下的Chl a含量（*w*，后同）最低，分别为22.98（T1）、24.32（T2）、28.95（T3）、25.37（T4）、24.61 mg·g^{-1}（T5），且不同质量浓度EBR处理下的Chl a含量显著高于CK2（7.38 mg·g^{-1}）。

由图2-B可知，随胁迫时间的延长，所有处理的Chl b含量呈下降的趋势。胁迫第3天时，各处理组的Chl b含量出现明显的下降；胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下Chl b含量降到最低，分别为18.43（T1）、19.49（T2）、19.89（T3）、16.48（T4）、20.08 mg·g^{-1}（T5），各处理显著低于CK1（23.11 mg·g^{-1}），高于CK2（16.46 mg·g^{-1}），相比CK2依次提高了11.97%（T1）、18.45%（T2）、20.86%（T3）、0.17%（T4）和22.04%（T5）。

由图2-C可知，在盐碱胁迫下，各处理的Chla+b含量的变化趋势与Chl a含量的变化趋势相同。胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下的Chla+b含量达到最低，分别为69.65（T1）、60.25（T2）、80.38（T3）、67.28（T4）、62.07 mg·g^{-1}（T5），各处理显著低于CK1（90.68 mg·g^{-1}），且显著高于CK2（30.14 mg·g^{-1}），相比CK2依次提高了131.09%（T1）、99.90%（T2）、166.69%（T3）、123.22%（T4）和105.94%（T5）。

由图2-D可知，在盐碱胁迫下，各处理的Chla/b变化均随胁迫时间的延长呈上升的趋势。胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下的Chla/b达最高值，分别为1.25（T1）、1.25（T2）、1.46（T3）、1.54（T4）、1.23（T5），且不同质量浓度EBR处理下的Chla/b显著高于CK2（0.45），相比于CK2依次提高了178.10%、178.21%、224.58%、243.19%和173.25%。

2.3　外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗叶片光合特性的影响

光合作用在一定程度上决定了植物的长势和抗逆性。从图3-A可以看出，随处理时间的延长，垂丝海棠叶片的P_n呈持续降低的趋势。胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下P_n降至最低，分别为18.47（T1）、18.87（T2）、22.57（T3）、18.53（T4）、18.46 μmol·m^{-2}·s^{-1}（T5），均显著显著低于CK1（23.10 μmol·m^{-2}·s^{-1}），高于CK2处理（17.37 μmol·m^{-2}·s^{-1}），相比于CK2依次提高了6.33%、8.64%、2.99%、6.72%和6.33%。由此可见，外源EBR对盐胁迫下P_n

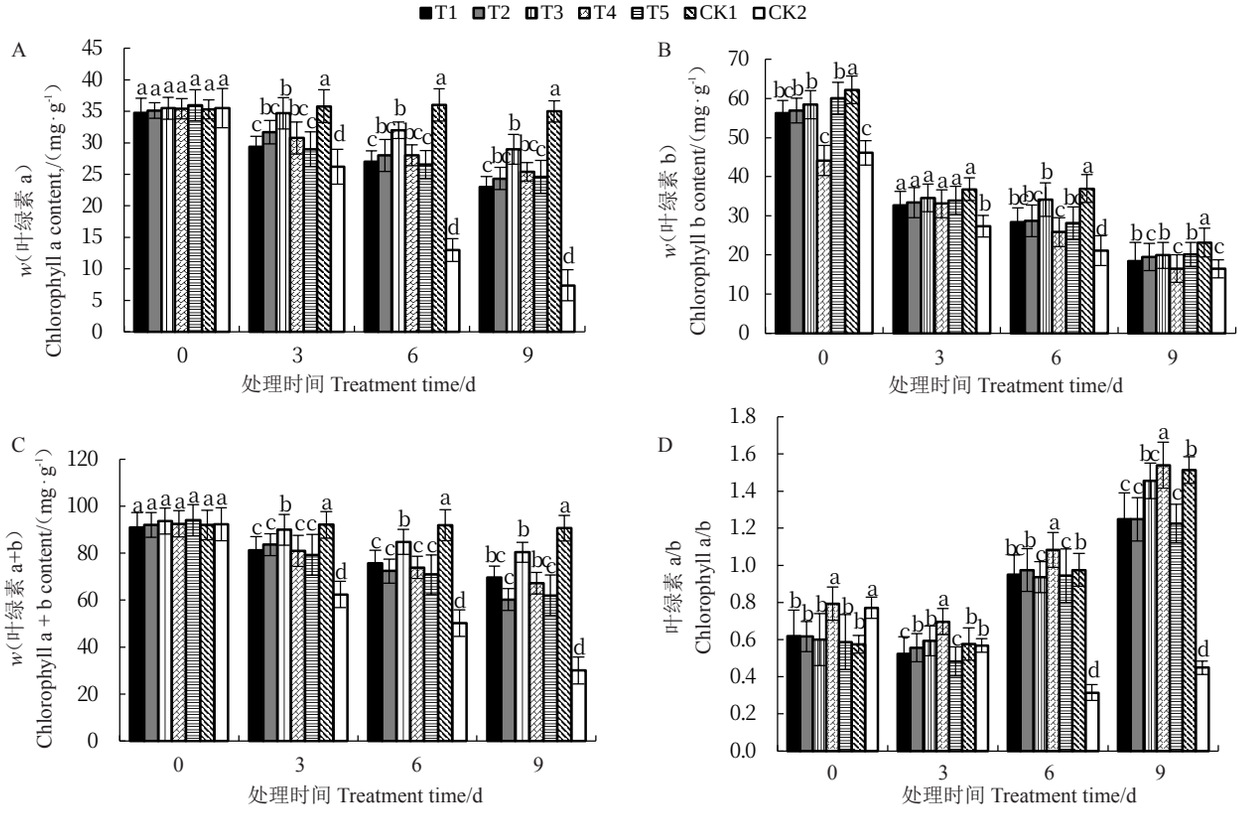


图2　盐碱胁迫下外源EBR对垂丝海棠光合色素含量的影响

Fig. 2　Effects of different concentrations of EBR on photosynthetic pigments content in *M. halliana* Koehne under saline-alkali stress

的下降具有缓解作用。

由图3-B可知，随胁迫时间的延长，垂丝海棠叶片的G_s与P_n趋势相同。胁迫至第3天时，各处理组的G_s出现明显的下降；胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理降至最低，分别为0.006（T1）、0.008（T2）、0.011（T3）、0.008（T4）、0.008 mol·m^{-2}·s^{-1}（T5），显著低于CK1（0.016 mol·m^{-2}·s^{-1}），显著高于CK2（0.005 mol·m^{-2}·s^{-1}），相比于CK2依次提高了15.90%、46.21%、97.23%、54.71%和55.08%。

由图3-C可知，在盐碱胁迫下，随时间的延长，垂丝海棠叶片的C_i呈逐渐升高的的趋势。胁迫至第3天时，C_i出现明显的上升；胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下C_i值达到最大，分别为271.43（T1）、255.38（T2）、225.93（T3）、246.68（T4）、268.33 μmol·mol^{-1}（T5），显著低于CK2（298.33 μmol·mol^{-1}），显著高于CK1（120.33 μmol·mol^{-1}），相比于CK2依次降低了9.02%、14.40%、24.27%、17.31%和10.06%，说明EBR能显著抑制盐碱胁迫下C_i的升高。

图3-D表明，在胁迫下随时间的延长，垂丝海棠叶片的T_r呈下降的趋势。胁迫至第9天时，不同质量浓度EBR处理下T_r达到值达到最小，分别为1.83（T1）、1.98（T2）、2.72（T3）、2.51（T4）、2.08 mmol·m^{-2}·s^{-1}（T5），显著高于CK2（1.46 mmol·m^{-2}·s^{-1}），显著低于CK1（3.41 mmol·m^{-2}·s^{-1}），相比于CK2依次升高了25.40%、35.70%、86.73%、72.31%和43.02%，说明EBR延缓了盐碱胁迫下T_r的下降。

2.4 外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗叶绿素荧光参数的影响

由图4可得，胁迫至第9天时，T1~T5的F_0、F_m、F_V/F_m、qP均显著低于CK1，且显著高于CK2，T3的下降幅度最小；此外T1~T5的*Y(NO)*、*Y(NPQ)*均显著高于CK1和CK2，其中T3的*Y(NO)*相较于CK2的上升幅度最小，比CK2高了334.29%；T3的*Y(NPQ)*的上升幅度最大，相较于CK2上升了488.54 %。

2.5 外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗抗氧化酶系统的影响

由图5-A可知，在盐碱胁迫下，随着时间延长，所有处理组的SOD活性均呈先升后降的趋势，胁迫至第3天，所有处理SOD活性均出现上升，其中T1和T5达到峰值，分别为106.89和104.74 U·g^{-1}；胁迫至第6天时，T2、T3、T4的SOD活性达到峰值，分别为120.32、130.89、119.61 U·g^{-1}；胁迫至第9天时，所

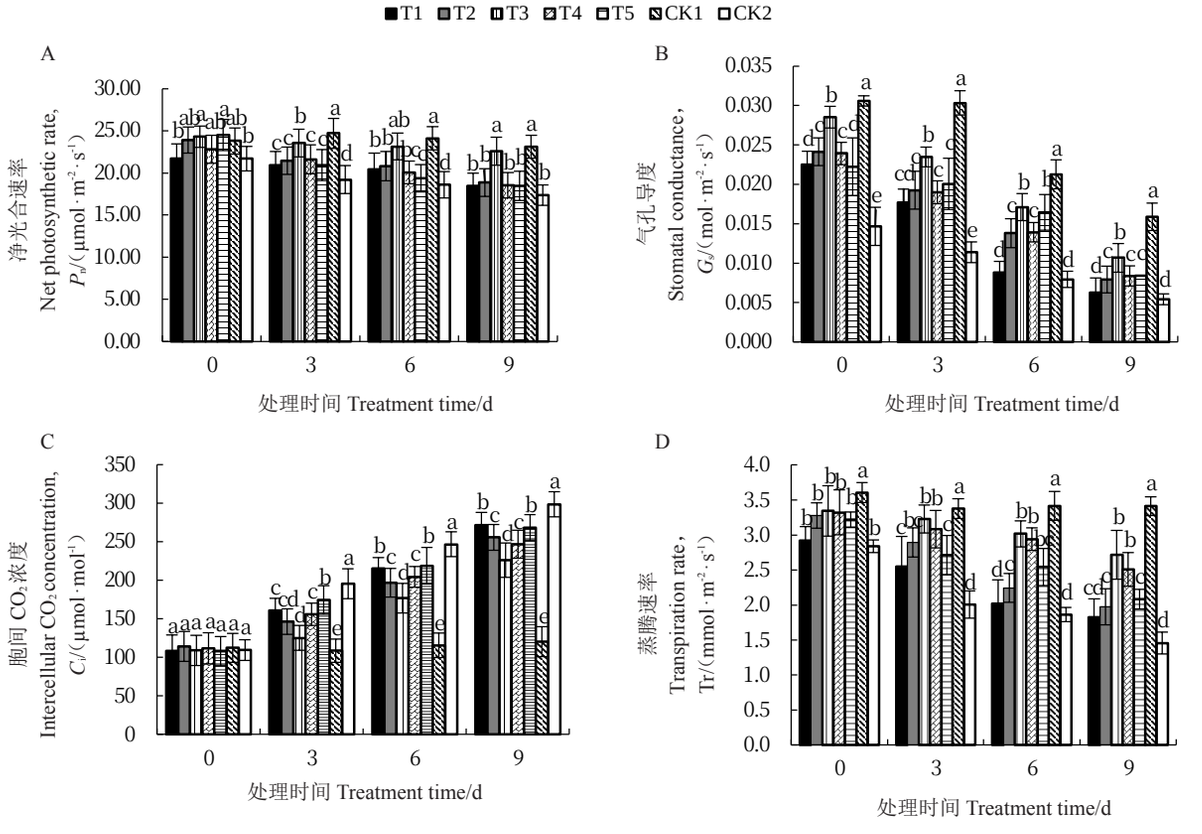


图3 外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗光合的影响

Fig. 3 Effect of exogenous EBR on photosynthetic parameters in *M. halliana* Koehne seedlings under saline-alkali stress

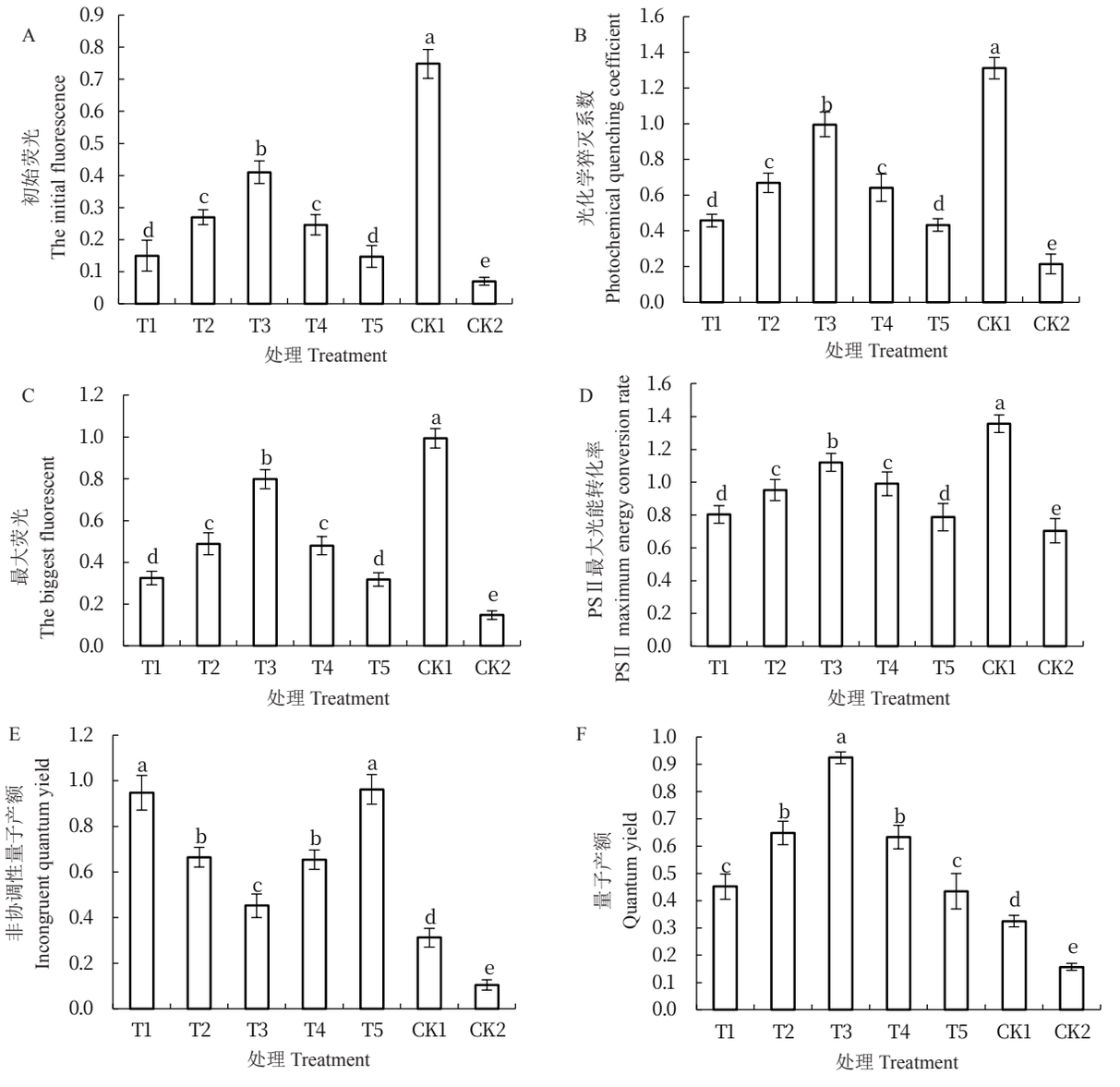


图 4　外源 EBR 对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗叶绿素荧光参数的影响

Fig. 4　Effect of exogenous EBR on chlorophyll fluorescence parameters in *M. halliana* Koehne seedlings under saline-alkali stress

有处理的SOD活性均显著高于CK2，相较于CK2分别高了9.75%、34.35%、53.02%、33.49%和8.47%。

由图5-B可知，在盐碱胁迫下，随着时间延长，所有处理组的POD活性均呈先升后降的趋势，胁迫至第3天，所有处理POD活性均出现上升趋势，其中T1和T5达到峰值，分别为106.89和104.74 μmol·g^{-1}·min^{-1}；胁迫至第6 d时，T2、T3、T4的POD活性达到峰值，分别为120.32、130.86、119.61 μmol·g^{-1}·min^{-1}；胁迫至第9天时，所有处理和CK1的POD活性均显著高于CK2，相较于CK2分别高了9.75%、34.35%、53.02%、33.49%和8.47%，T3的上升幅度最大。

综上，在盐碱胁迫下，T3的SOD、POD活性峰值的出现与EBR质量浓度有关，且T3峰值的出现说明T3抗氧化能力更强。

2.6　外源EBR对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗Na^+、K^+含量的影响

由图6可得，当胁迫至第9天时，T1~T5的根、茎、叶中的Na^+含量均显著高于CK1，且显著低于CK2，其中T3相较于CK1上升幅度最小，T3的根、茎、叶中Na^+含量较CK1分别上升了22.60%、55.97%和36.21%；当胁迫至第9天时，T1~T5的根、茎、叶中的K^+含量均显著低于CK1，且显著高于CK2，其中T3相较于CK1的下降幅度最小，T3的根茎叶中K^+含量较CK1分别降低了12.09%、13.10%和8.83%。

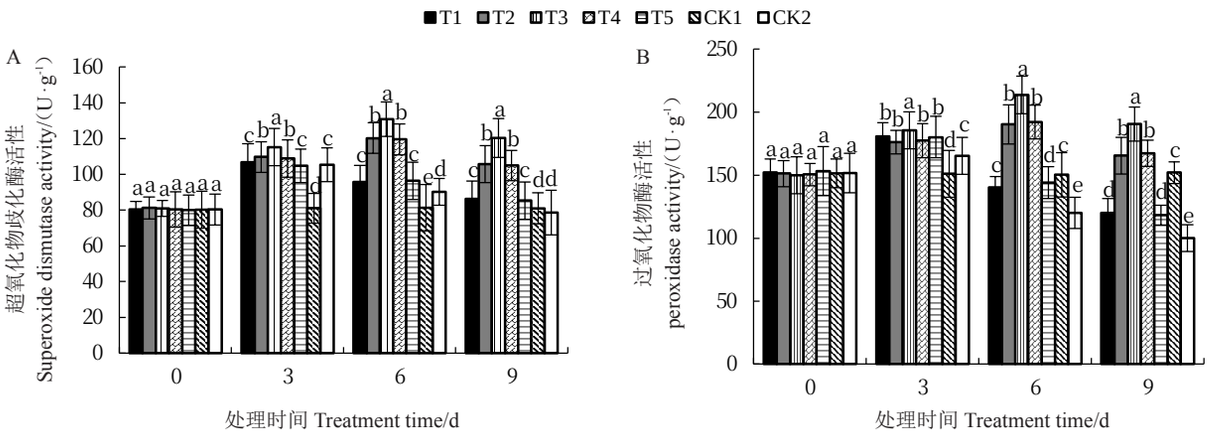


图 5　外源 EBR 对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗 SOD、POD 活性的影响

Fig. 5　Effect of exogenous EBR on SOD and POD activities of *M. halliana* Koehne seedlings under saline-alkali stress

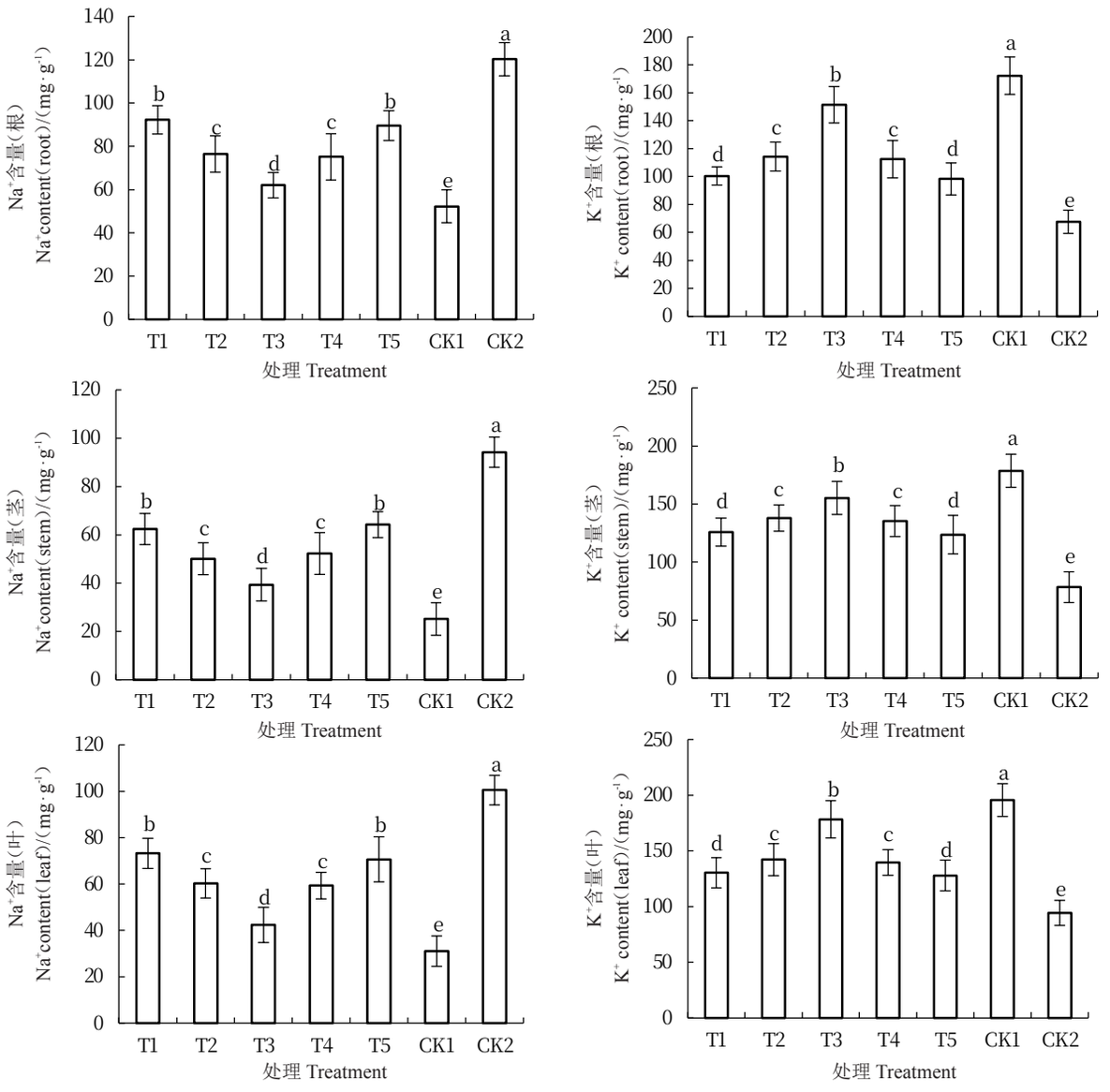


图 6　外源 EBR 对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗根、茎、叶中 Na^+、K^+含量的影响

Fig. 6　Effect of exogenous EBR on the contents of Na^+ and K^+ in root, stem and leaf in *M. halliana* Koehne seedlings under saline-alkali stress

2.7　主成分分析

对本试验中所有处理的21个指标进行主成分分析，提取特征值＞1的3个主成分，其特征值分别为17.242、2.31、1.129，累计方差贡献率达到98.482%，符合分析要求。表1显示，第一主成分（PC1）综合了P_n、G_s、T_r、*RWC*、F_0、F_m、F_v/F_m、*qP*、叶绿素相对含量（SPAD）、*REC*、SOD、POD、K^+（根）、K^+（茎）、K^+（叶）等指标的信息，第二主成分综合了C_i、Na^+（根）、Na^+（茎）、Na^+（叶）等指标的信息。得分（*F*）是每个主成分得分与对应贡献率乘积之和，即*F*=*F1*×82.105%+*F2*×10.999%+*F3*×5.378%（表2）。由表3可知，垂丝海棠在不同质量浓度EBR处理下的综合得分排名为T3>T2>T4>T5>T1。

表1　主成分分析后的旋转载荷矩阵

Table 1　Rotational load matrix after principal component analysis

指标 Index	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
P_n	0.931	0.178	0.100
G_s	0.993	−0.073	0.005
C_i	−0.989	0.118	−0.076
T_r	0.972	−0.059	0.024
F_0	0.926	−0.357	0.001
F_m	0.954	−0.277	−0.007
F_v/F_m	0.972	−0.176	−0.110
qP	0.962	−0.270	0.014
Y(*NPQ*)	0.435	0.879	−0.083
YNO	−0.145	0.639	0.750
SPAD	0.955	0.115	0.270
REC	−0.985	0.104	0.040
RWC	0.983	−0.079	0.036
SOD	0.622	0.619	−0.467
POD	0.729	0.543	−0.413
Na^+Root	−0.999	0.007	−0.023
Na^+Stem	−0.991	0.106	0.030
Na^+Leaf	−0.991	0.016	−0.109
K^+Root	0.995	0.032	0.071
K^+Stem	0.952	0.209	0.223
K^+Leaf	0.997	0.005	0.003

表2　方差贡献率载荷矩阵

Table 2　Variance contribution load matrix

指标 Index	特征值 Eiges values	方差贡献率 Proportion of variance/%	累计方差贡献率 Cumulative variance/%
PC1	17.242	82.105	82.105
PC2	2.310	10.999	93.105
PC3	1.129	5.378	98.482

表3　综合得分排名

Table 3　Ranking of comprehensive scores

处理 Treatments	*F1*	*F2*	*F3*	综合得分 Composite score	综合得分排名 Composite scores ranking
T1	−0.534 76	0.219 58	1.045 64	−0.36	6
T2	0.113 75	0.727 71	−0.152 35	0.17	3
T3	0.804 94	0.925 85	−1.288 44	0.69	2
T4	0.087 33	0.653 06	−0.180 04	0.13	4
T5	−0.467 29	0.291 45	1.352 92	−0.28	5
CK1	1.551 59	−1.613 84	0.338 49	1.11	1
CK2	−1.555 56	−1.203 79	−1.116 23	−1.47	7

3　讨　论

盐碱胁迫对植物的伤害是复杂的生理生化过程，主要包括渗透胁迫、离子毒害、高pH值伤害和活性氧胁迫等[18]。高立杨等[19]对垂丝海棠的研究中发现，相对电导率可以反映植物在逆境条件下透性变化和膜受损程度，相对电导率越高，说明植物受伤害程度越严重。叶片相对含水量是评价植物叶片保水力的重要指标之一[20]。Müssig等[21]研究表明，喷施EBR增大了根系表面积，增加了根系与介质的接触面积，增强了吸收养分和水分的能力，从而维持其功能行为。本试验中，在盐碱胁迫下，0.2 mg·L^{-1} EBR处理时叶片相对含水量达到峰值；所有处理的相对电导率随时间延长均逐渐升高，说明盐碱胁迫下垂丝海棠的膜系统被破坏造成了电解质外渗，这与王静等[22]对蜡梅幼苗研究的结果一致。胁迫第9天时，T3处理的相对电导率相比于CK1上升的幅度最小，说明0.2 mg·L^{-1}的EBR对垂丝海棠在盐碱胁迫下造成的伤害最小。

盐碱胁迫引起的高pH，破坏了离子稳态，使与叶绿素合成有关的离子沉淀，导致叶绿素合成受阻[23]。万绮雯等[24]在对茶树的研究中发现叶面喷施EBR显著增加了茶树叶片叶绿素含量。本试验中，喷施不同质量浓度的外源EBR，盐碱胁迫下垂丝海棠叶片叶绿素含量相比CK2有不同程度的增加，0.2 mg·L^{-1} EBR处理时最佳。植物光合作用对于植物生长发育至关重要，盐碱胁迫会严重抑制植物光合作用[25]，进而影响植物正常生长。盐碱胁迫下影响植物光合效率降低的主要因素包括气孔因素和非气孔因素，C_i和G_s的变化趋势可作为判断光合效率的降低主要是受气孔因素影响还是受非气孔因素影响的标准。当C_i和G_s同时降低时，光合速率降低是

由气孔因素引起；反之，则为非气孔因素引起[26-27]。本试验胁迫至第9天时，所有处理的*Ci*显著高于CK1，而所有处理的G_s则显著低于CK1，说明垂丝海棠幼苗光合效率下降的主要因素是非气孔因素。研究表明非气孔限制已成为促使光合速率降低的主要因子，这可能是由于高盐胁迫导致细胞中盐离子的大量累积，破坏叶绿体结构，造成叶片光合器官损伤、叶绿素含量降低、叶肉细胞光合活性下降[28]。喷施EBR后，胁迫下垂丝海棠的P_n、G_s、T_r随EBR质量浓度的升高呈先升后降的趋势，T3处理达到峰值，说明外源EBR可以缓解盐胁迫下垂丝海棠叶片光合速率，且缓解程度随质量浓度变化，0.2 mg·L^{-1} EBR处理缓解效果最佳。李翔[29]在对番茄的研究中指出，EBR对番茄叶片非气孔因素具有调节作用，本文观点与之相似。覃凤飞等[30]在对紫花苜蓿的研究中也证明，外源EBR可调整紫花苜蓿植株结构，降低叶面温度，促进光合色素的合成，提高光合效率。本试验中，胁迫至第9天时，T1~T5的F_0、F_m、F_v/F_m、qP均显著低于CK1且显著高于CK2，说明在盐碱胁迫下各处理的光合作用被显著抑制，且外源EBR可有效缓解这种抑制。

盐碱胁迫可抑制植物光合作用，过剩的光能会对植物的膜系统造成破坏，产生大量的活性氧、自由基，形成氧化胁迫，对植物造成严重伤害[31]。研究表明SOD、POD等酶活性变化与植物耐受胁迫程度有关[32]。SOD、POD能够清除生物体内超氧阴离子自由基，保护机体免受自由基的伤害[33]。本试验中，随着处理时间的变化，幼苗中SOD和POD的活性呈现先升后降的趋势，可能是由于植物在初期会启动防御体系，增强SOD、POD等抗氧化酶活性，及时清除活性氧，但若胁迫持续或加剧，超过植株最大耐受性，抗氧化酶系统完全被破坏的时候SOD、POD活性出现下降[34]。在胁迫下喷施外源EBR后SOD、POD活性显著提高，表明EBR处理能够增强植物抗氧化系统的防御能力。

离子平衡是植物维持正常代谢的基础[35]。盐碱胁迫下，由于Na^+的过量吸收，会抑制K^+的正常吸收，进而导致植物体内离子代谢紊乱[36]；Na^+过量的积累会造成植物膜系统不可逆的伤害[37]；保持低Na^+高K^+是植物正常生长的必要条件[38]。本试验中，通过施加不同质量浓度的外源EBR，Na^+含量呈先降低后升高的趋势，T3处理降至最低，K^+含量呈先升高后降低的趋势，说明0.2 mg·L^{-1}的EBR对垂丝海棠在盐碱胁迫下造成的伤害最小。刘铎[39]在紫花苜蓿上的研究结果也表明盐碱胁迫下，Na^+含量过高会抑制K^+的吸收，进而导致植物枯萎死亡。

主成分分析方法在植物耐逆性鉴定与评价中已有广泛应用[40]。本试验以垂丝海棠21个相关指标为依据，进行主成分分析，根据综合评价可知，盐碱胁迫下不同质量浓度EBR对垂丝海棠生理特性的影响排名为：T3>T2>T4>T5>T1，即T3处理0.2 mg·L^{-1} EBR能有效缓解垂丝海棠的盐碱胁迫。

4 结 论

盐碱胁迫下，外源EBR可缓解盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗光合效率的降低、叶绿素含量的降解及盐碱胁迫造成的氧化损伤，维持抗氧化酶系统的稳定，降低胁迫下膜透性损害，降低Na^+的吸收，维护细胞膜的结构和功能，并具有质量浓度效应，0.2 mg·L^{-1}为最佳质量浓度。

参考文献 References:

[1] 翟衡，赵政阳，王志强，束怀瑞 . 世界苹果产业发展趋势分析[J]. 果树学报，2005，22(1)：44-50.
ZHAI Heng，ZHAO Zhengyang，WANG Zhiqiang，SHU Huairui. Analysis of the development trend of the world apple industry[J]. Journal of Fruit Science，2005，22(1)：44-50.

[2] 张仲兴，程丽，王双成，张德，刘兵，王延秀 . 垂丝海棠MhMYB114-Like的克隆及其在苹果愈伤组织中的抗缺铁功能鉴定[J]. 园艺学报，2021，48(1)：127-136.
ZHANG Zhongxing，CHENG Li，WANG Shuangcheng，ZHANG De，LIU Bing，WANG Yanxiu. Cloning of MhMYB114-Like from malus halliana and its functional identification of iron deficiency tolerance in apple callus[J]. Acta Horticulturae Sinica，2021，48(1)：127-136.

[3] SUKEO K，ZHU T C. Degeneration and conservational trial of aneurolepidium chinense grassland in northern China[J]. Japanese Journal of Grassland Science，1991，37(1)：91-99.

[4] HOUMANI H，RODRÍGUEZ-RUIZ M，PALMA J M，CHEDLY A，FRANCISCO J C. Modulation of superoxide dismutase (SOD) isozymes by organ development and high long-term salinity in the halophyte *Cakile maritima*[J]. Protoplasma，2016，253(3)：885-894.

[5] 赵婷，杨建宁，吴玉霞，张瑞，刘兵，张夏燚，高立杨，王延秀 . 外源H_2S处理对盐碱胁迫下垂丝海棠幼苗生理特性的影响[J]. 果树学报，2020，37(8)：1156-1167.
ZHAO Ting，YANG Jianning，WU Yuxia，ZHANG Rui，LIU Bing，ZHANG Xiayi，GAO Liyang，WANG Yanxiu. Effects of exogenous H_2S treatment on physiological characteristics of salt-alkali stressed seedling of *Malus halliana*[J]. Journal of Fruit Science，2020，37(8)：1156-1167.

[6] 张瑞，贾旭梅，朱祖雷，张夏燚，赵通，郭爱霞，刘兵，高立杨，王

延秀 . ‘烟富六号’苹果在不同砧木上响应盐碱胁迫的光合及生理特性[J]. 果树学报，2019，36(6)：718-728.
ZHANG Rui，JIA Xumei，ZHU Zulei，ZHANG Xiayi，ZHAO Tong，GUO Aixia，LIU Bing，GAO Liyang，WANG Yanxiu. Photosynthesis and physiological characteristics of ‘Yanfu 6’ apple under saline-alkali stress on different rootstocks[J]. Journal of Fruit Science，2019，36(6)：718-728.

[7] AHMAD P，PRASAD M. Plant signaling under abiotic stress environment[M]. New York：Springer，2012.

[8] JAILLAIS Y，VERT G. Brassinosteroids，gibberellins and light-mediated signalling are the three-way controls of plant sprouting [J]. Nature Cell Biology，2012，14(8)：788-790.

[9] FRIDMAN Y，SAVALDI-GOLDSTEIN S. Brassinosteroids in growth control：how，when and where[J]. Plant Science，2013，209：24-31.

[10] JANECZKO A，JANA O K，POCIECHA E，et al. Physiological effects and transport of 2,4-epibrassinolide in heat-stressed barley[J]. Acta Physiologiae Plantarum，2011，33(4)：1249-1259.

[11] 胡文海，闫小红，李晓红，曹灶桂 . 24-表油菜素内酯对干旱胁迫下辣椒叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响[J]. 植物研究，2021，41(1)：53-59.
HU Wenhai，YAN Xiaohong，LI Xiaohong，CAO Zaogui. Effects of 24-epibrassinolide on the chlorophyll fluorescence transient in leaves of pepper under drought stress[J]. Journal of Botanical Research，2021，41(1)：53-59.

[12] 吴杨，高慧纯，张必弦，张海玲，王全伟，刘鑫磊，栾晓燕，马岩松 . 24-表油菜素内酯对盐碱胁迫下大豆生育、生理及细胞超微结构的影响[J]. 中国农业科学，2017，50(5)：811-821.
WU Yang，GAO Huichun，ZHANG Bixian，ZHANG Hailing，WANG Quanwei，LIU Xinlei，LUAN Xiaoyan，MA Yansong. Effects of 24-brassinolide on the fertility，physiological characteristics and cell ultra-structure of soybean under saline-alkali stress[J]. Scientia Agriculture Sinica，2017，50(5)：811-821.

[13] 寇江涛 . 外源 EBR 对 NaCl 胁迫下燕麦幼苗无机离子吸收、运输和分配的影响[J]. 生态学杂志，2020，39(3)：855-864.
KOU Jiangtao. Effects of exogenous 2,4-epibrassinolide on the absorption，transportation and allocation of inorganic ions in *Avena sativa* L. seedlings under NaCl stress[J]. Chinese Journal of Ecology，2020，39(3)：855-864.

[14] 刘丹，郭广昊，刘磊，邹春雷，武沛然，杨芳芳，王玉波，李彩凤 . 外源喷施油菜素内酯对碱胁迫下甜菜生长的影响[J]. 西北农业学报，2018，27(10)：1461-1469.
LIU Dan，GUO Guanghao，LIU Lei，ZOU Chunlei，WU Peiran，YANG Fangfang，WANG Yubo，LI Caifeng. Effects of exogenous application of brassinolide on sugar beet growth under alkali stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica，2018，27(10)：1461-1469.

[15] 甘肃省农业科学院果树研究所 . 甘肃果树志[M]. 北京：中国农业出版社，1995.
Fruit Institute，Gansu Academy of Agricultural Sciences. Chorography of Gansu fruit trees[M]. Beijing: China Agricultural Press，1995.

[16] KAWAGUCHI S，KITANO T，ITO K，MINAKATE A. Sodium-ion activity and electrical conductivity of poly(maleic acid)and poly(isobutylene-alt-maleic acid)in aqueous salt-free solution[J]. Macromolecules，1991，24(23)：6335-6339.

[17] 山雨思，代欢欢，何潇，辛正琦，吴能表 . 外源茉莉酸甲酯和水杨酸对盐胁迫下颠茄生理特性和次生代谢的影响[J]. 植物生理学报，2019，55(9)：1335-1346.
SHAN Yusi，DAI Huanhuan，HE Xiao，XIN Zhengqi，WU Nengbiao. Effects of exogenous methyl jasmonate and salicylic acid on physiological characteristics and secondary metabolism of *Atropa belladonna* under NaCl stress[J]. Plant Physiology Journal，2019，55(9)：1335-1346.

[18] 王新亮，王健，贾晶晶，唐立平 . 果树响应盐碱胁迫机理的研究进展[J]. 河北农业科学，2020，24(5)：63-67.
WANG Xinliang，WANG Jian，JIA Jingjing，TANG Liping. Research progress in response mechanism of fruit trees to saline-alkali stress[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences，2020，24(5)：63-67.

[19] 高立杨，刘兵，张瑞，张夏燚，王延秀 . 褪黑素对盐碱复合胁迫下垂丝海棠光合及生理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报，2020，55(2)：90-97.
GAO Liyang，LIU Bing，ZHAG Rui，ZHANG Xiayi，WANG Yanxiu. Effects of melatonin on photosynthetic and physiological characteristics of *Malus pendens* under saline-alkali stress[J]. Journal of Gansu Agricultural University，2020，55(2)：90-97.

[20] 由佳辉，高林，王海鸥，卢倩倩，周龙，李树德 . 干旱胁迫对 9 个葡萄砧木品种生理指标的影响[J]. 经济林研究，2020，38(3)：180-189.
YOU Jiahui，GAO Lin，WANG Haiou，LU Qianqian，ZHOU Long，LI Shude. Effects of drought stress on physiological indexes of nine grape rootstock varieties[J]. Non-wood Forest Research，2020，38(3)：180-189.

[21] MÜSSIG C，SHIN G H，ALTMANN T. Brassinosteroids promote root growth in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology，2003，133(3)：1261-1271.

[22] 王静，罗燕杰，逯羽静，李海燕，肖可，李庆卫 . 盐碱复合胁迫对蜡梅幼苗生长及生理响应的研究[J]. 西南农业学报，2020，33(11)：2496-2502
WANG Jing，LUO Yanjie，TI Yujing，LI Haiyan，XIAO Ke，LI Qingwei. Growth and physiological characteristics of chimonanthus praecox to saline-alkali tolerance[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2020，33(11)：2496-2502

[23] 杜中军，翟衡，潘志勇，解秀芹 . 盐胁迫下苹果砧木光合能力及光合色素的变化[J]. 果树学报，2001，18(4)：200-203.
DU Zhongjun，ZHAI Heng，PAN Zhiyong，XIE Xiuqin. Change of photosynthetic capability and pigment content of apple rootstocks under salt-stress[J]. Journal of Fruit Science，2001，18(4)：200-203.

[24] 万绮雯，杨妮，李逸民，韩妙华，林士佳，滕瑞敏，庄静 . 外源 24-表油菜素内酯对茶树光合特性的影响[J]. 茶叶科学，2021，41(1)：58-70.
WAN Qiwen，YANG Ni，LI Yimin，HAN Miaohuan，LIN Shijia，TENG Ruimin，ZHUANG Jing. Effects of exogenous 24-epibrassinolide on photosynthetic characteristics of tea plants[J]. Journal of Tea Science，2021，41(1)：58-70.

[25] ZHANG Y，KAISER E，ZHANG Y. Short-term salt stress strongly affects dynamic photosynthesis，but not steady-state photosynthesis，in tomato (*Solanum lycopersicum*)[J]. Environmental and Experimental Botany，2018，149：109-119.

[26] 刘旭，林碧英，李彩霞，吴宏琪，祖颖达，钟路明 . 外源脱落酸对盐胁迫下茄子幼苗生理特性的影响[J]. 河南农业大学学报，

2020，54(2)：231-236.
LIU Xu，LIN Biying，LI Caixia，WU Hongqi，ZU Yingda，ZHONG Luming. Effects of exogenous abscisic acid on physiological characteristics of eggplant seedlings under salt stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2020，54(2)：231-236.

[27] 李俊周，乔江方，李梦琪，杜彦修，赵全志 . 短时水分胁迫对水稻叶片光合作用的影响[J]. 干旱地区农业研究，2017，35(3)：126-129.
LI Junzhou，QIAO Jiangfang，LI Mengqi，DU Yanxiu，ZHAO Quanzhi. The effects of short-term water stress on leaf photosynthesis in rice[J]. Agricultural Research in Arid Areas，2017，35(3)：126-129.

[28] YANG X，CHEN X，GE Q，LI B，TONG Y P，ZHANG A M，LI Z S，KUANG T Y，LU C M. Tolerance of photosynthesis to photoinhibition，high temperature and drought stress in flag leaves of wheat：a comparison between a hybridization line and its parents grown under field conditions[J]. Plant Science，2006，171(3)：389-397

[29] 李翔 . 外源油菜素内酯对弱光胁迫下番茄幼苗生长及碳同化的影响[D]. 南京：南京农业大学，2016.
LI Xiang. The effects of growth and carbon assimilation under low light stress by applying exogenous epibrassinolide[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2016.

[30] 覃凤飞，李志华，刘信宝，渠晖，平措卓玛，洛松群措，苏梦涵 . 外源 2,4-表油菜素内酯对越夏期高温与弱光胁迫下紫花苜蓿生长和光合性能的影响[J]. 草业学报，2020，29(9)：146-160.
QIN Fengfei，LI Zhihua，LIU Xinbao，QU Hui，PINGCUO-Zhuoma，LUOSONG Quncuo，SU Menghan. Effects of exogenous 2,4-epibrassinolide on the growth and photosynthesis of alfalfa under high temperature and low light stress in summer[J]. Acta Prataculturae Sinica，2020，29(9)：146-160.

[31] 李莉，张一弓，贾纳提，李学森 . 盐碱胁迫下新疆野豌豆种子萌发及幼苗生理响应[J]. 草业学报，2016，25(9)：46-53.
LI Li，ZHANG Yigong，JIA Nati，LI Xuesen. Seed germination and physiological responses of *Vicia costata* under saline-alkali stress conditions[J]. Acta Prataculturae Sinica，2016，25(9)：46-53.

[32] AMOR N B，JIMENEZ A，MEGDICHE W. Respomse of antioxidant systems to NaCl stress in the halophyte *Cakile maritima*[J]. Physiologia Plantrum，2006，126(3)：446-457.

[33] KRAUSE G H，WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis：the basics[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology，1991，42(1)：313-349.

[34] 艾力江•麦麦提，齐曼•尤努斯，公勤 . NaCl 胁迫对尖果沙枣实生苗膜脂过氧化与抗氧化酶系的影响[J]. 果树学报，2008，25(4)：531-536.
Alejandro · Maimati，Zaman · Yunus，GONG Qin. Effects of NaCl stress on lipid peroxidation and activity of antioxidant enzymes in *Elaeagnus oxycarpa*[J]. Journal of Fruit Science，2008，25(4)：531-536.

[35] ADAMS P，THOMAS J C，VERNON D M，BOHNERT H J，JENSEN R G. Distinct cellular and organismic responses to salt stress[J]. Plant and Cell Physiology，1992，33 (8)：1215-1223.

[36] 刘杰，李云玲，孙虎，孙明茂，苗锦山 . 盐碱胁迫对向日葵子叶渗透调节及离子平衡的影响[J]. 安徽农业大学学报，2015，42(1)：86-91.
LIU Jie，LI Yunling，SUN Hu，SUN Mingmao，MIAO Jinshan. Effects of salt and alkali stresses on osmotic adjustment and ionic balance in sunflower cotyledon[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2015，42(1)：86-91.

[37] 刘滨硕，康春莉，王鑫，包国章 . 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征[J]. 农业工程学报，2014，30(23)：166-173.
LIU Binshuo，KANG Chunli，WANG Xin，BAO Guozhang. Physiological and biochemical response characteristics of *Leymus chinensis* to saline- alkali stress[J]. Journal of Agricultural Engineering，2014，30(23)：166-173.

[38] TAVAKKOLI E，FATEHI F，COVENTRY S. Additive effects of Na^+ and Cl^- ions on barley growth under salinity stress[J]. Journal of Experimental Botany，2011，62 (6)：2189-2203.

[39] 刘铎 . 紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)品种耐碱性生理差异及硅诱抗效应[D]. 北京：中国科学院大学，2018.
LIU Duo. The physiological differences of the varieties and silicon priming effects of alkaline tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2018.

[40] STEINBERG S L，MILL J C，MCFARLAND M J. Dry matter partioning and vegetative growth of young peach tree under water stress[J]. Functional Plant Biology，1990，17 (1)：23-26.

欢迎订阅2022年《果树学报》

《果树学报》是中国农业科学院郑州果树研究所主办的国家级学术期刊，分别被有关权威期刊评价机构评为中国精品科技期刊、中国农林水产类权威学术期刊、北大中文核心期刊、中国科技核心期刊，已被中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊（核心库）、中国知网、中国知网双语出版、Scopus数据库等国内外重要数据库收录。2020年《中国科技期刊引证报告》（核心版）中，本刊总被引频次2824，影响因子为1.350；中国学术期刊影响因子年报中，本刊复合影响因子为1.976，期刊综合影响因子为1.504。已成为国内外有影响的学术期刊之一。《果树学报》着重选发密切结合我国果树科研、教学、生产实际，反映学科学术水平和发展动向的优秀稿件，及时报道重大科研成果、阶段性成果和科研进展情况。栏目设置有种质资源•遗传育种•分子生物学、栽培•生理•生态、植物保护•果品质量与安全、贮藏•加工、专论与综述、技术与方法、新品种选育报告等。读者对象为果树学科的科研人员、高等农业院校师生及基层果树管理技术人员。月刊，每期148页码，定价20元，全年12期共240元。邮发代号：36-93，国际代号BM/1107。欢迎投稿，欢迎订阅。

编辑部地址：河南省郑州市未来路南端 中国农业科学院郑州果树研究所 **邮编**：450009

电话：0371-63387308

E-mail：guoshuxuebao@caas.cn

网址：www.fruitsci.cn

在线投稿：http://gskk.cbpt.cnki.net