外源H_2O_2对盐碱胁迫下万寿菊光合能力和抗性生理的影响

朱进威,蒋倩*,张旺君,刘兴,王燕,缑旭林

(甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探究外源H_2O_2对混合盐碱胁迫下盆栽万寿菊(*Tagetes erecta*)的光合特性和生理功能的影响,筛选抗盐碱性优异的外源H_2O_2浓度。【方法】设置CK与混合盐碱胁迫加5种浓度外源H_2O_2处理,即T1(0 μmol/L)、T2(50 μmol/L)、T3(100 μmol/L)、T4(200 μmol/L)和T5(300 μmol/L)处理。分别观察万寿菊表型变化,并测定其叶绿素含量、叶片渗透物质含量、相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)含量、叶片荧光参数、抗氧化酶活性和根系构型参数,并进行相关性和主成分分析。【结果】随盐碱胁迫时间的延长,万寿菊叶片的REC、MDA、叶片渗透物质、根系构型参数呈上升趋势,叶绿素含量、叶片荧光特性参数呈下降趋势。外源H_2O_2处理后叶片各指标值均有减小,且存在明显的浓度效应。其中,T4(200 μmol/L)处理下叶绿素含量、叶片荧光参数和根系构型参数降幅最小。相反MDA含量和REC升幅最小,而叶片渗透物质含量升幅最大。经综合评价分析得出,各处理排名为CK>T4>T3>T2>T5>T1。【结论】外源H_2O_2可以促进万寿菊根系生长,增强叶片的光合能力和渗透调节能力,同时提高抗氧化酶活性,从而减缓膜脂过氧化损伤,最终缓解盐碱胁迫对万寿菊的伤害,H_2O_2浓度以200 μmol/L效果最佳。

关键词:外源H_2O_2;万寿菊;盐碱胁迫;生理特性;光合特性

中图分类号:S681.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0070-13

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.008

近年来,由气候变化和人类活动的影响,土壤盐碱化程度不断加剧。全球盐渍土的总面积约1.1×10^9 hm^2,其中约14%为不适宜生产的林地、湿地和自然保护区[1]。在我国,盐渍土的总面积约为9 913.3万hm^2,主要分布在我国东北、华北、西北、长江中上游及滨海地区[2]。盐分过度积累会导致土壤渗透性降低,从而使植物根系难以吸收水分[3]。此外,土壤中过多的盐分和碱性物质会对植物叶片产生离子毒害和氧化损伤,影响光合作用和呼吸作用,进而限制植物的生长发育[4-6]。大量研究表明,施用植物激素如茉莉酸[7]、水杨酸[8]、脱落酸[9]、硫[10]、褪黑素[11]、一氧化氮[12]均可以提高植物的抗逆能力。

过氧化氢(H_2O_2)在植物生长中扮演着重要的双重角色[13-14]。首先,它在植物中起到信号分子的作用,参与植物生长发育的调控,诸如促进种子的发芽和光合作用[15]。其次,它在氧化应激响应中发挥一定的作用,适量的H_2O_2可以促进抗氧化酶的产生,从而减轻氧化应激所导致的损伤。然而,过量的H_2O_2可能会对植物造成氧化损伤[16]。因此,H_2O_2对植物生理生化过程起重要的调控作用。前人研究表明,外源H_2O_2处理通过激活玉米种子内过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,从而降低盐胁迫诱导的氧化伤害和膜损伤,最终促进玉米在盐胁迫下的生长发育[18]。混合盐碱胁迫下,外源H_2O_2通过抑制燕麦幼苗叶片内H_2O_2含量急剧增

收稿日期:2024-04-22;**修回日期:**2024-08-23

基金资助:甘肃省高等学校创新基金项目(022B-098)

作者简介:朱进威(2000-),女,甘肃天水人,硕士研究生。E-mail:1835993@qq.com

*通信作者,研究方向为观赏植物逆境生理。E-mail:329691193@qq.com

加，同时促进脯氨酸（Pro）的不断积累，从而增强其抗盐碱性[19]。外源喷施H_2O_2和油菜素内酯还可以促进烟苗恢复生长、恢复活性氧产生与清除的平衡、增加渗透调节物质含量和光能利用率来有效缓解低温胁迫对烟草的损害[20]。此外，H_2O_2还可以通过提高光合暗反应酶活性来增强裸燕麦幼苗的碳同化能力，从而减轻镉胁迫对生长的负面影响[17]。然而，目前关于外源H_2O_2处理的研究大多集中于蔬菜[21-22]、果树[23-24]等研究领域，而对观赏植物尤其是草本花卉鲜见报道。

万寿菊（*Tagetes erecta*）为菊科万寿菊属的一年生草本植物，具有较高的经济价值和观赏价值。万寿菊的花含有丰富的叶黄素，可以作为医药、食品、饲料的原材料。多年来，万寿菊始终是我国节日花坛、公路绿化带和花境的首选植物[25-27]。万寿菊是一种广泛栽植的植物，因其对盐渍化土壤有较好的适应能力，对于盐渍化土壤的开发利用具有很高的潜在价值[28]。然而，在严重的盐碱胁迫下，万寿菊也会出现生长停滞、叶片黄化、萎蔫凋落，甚至死亡的现象[29]。本试验以盆栽万寿菊为研究对象，探讨不同浓度外源H_2O_2处理对混合盐碱胁迫下的万寿菊的光合和生理特性的影响，旨在为万寿菊的逆境生产栽培提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

本试验在甘肃农业大学大棚内进行。试验所选万寿菊由甘肃新时代园林工程公司提供，待万寿菊长到3～4片真叶时，于2023年3月5日移栽至装有等量基质的塑料盆内（口径 10.3 cm、深度 8.5 cm），每盆 0.8 kg基质（珍珠岩∶蛭石∶泥炭＝1∶1∶3）。移栽后用等量的清水进行浇灌直至底部漏水为止，然后全部移放到30 ℃智能温室中进行培养，培养期间根据万寿菊长势情况每隔5天进行营养液浇灌，10天后进行混合盐碱胁迫处理。

1.2　试验设计

1.2.1　*预试验*　栽后15天进行预试验，盐碱溶液的浓度设置为中性盐（NaCl）和碱性盐（$NaHCO_3$）等摩尔质量混合，包括CK（0 mmol/L）、MT1（40 mmol/L）、MT2（80 mmol/L）、MT3（120 mmol/L）和MT4（160 mmol/L）。CK组仅用去离子水进行浇灌，而MT1、MT2、MT3和MT4组分别通过根灌的方式施用相应浓度的盐碱溶液（100 mL），每个处理组含有10株。在处理后的第7天，进行植株表型观察，通过评估植株叶片的黄化程度和冠幅大小来确定临界盐碱浓度。结果显示，MT1处理组的万寿菊叶片呈轻微黄化，但其生长状态与CK组无明显差异；MT2处理组的万寿菊叶片则出现严重黄化和萎蔫现象；而MT3和MT4处理组的植株则发生死亡现象。因此，选择根施80 mmol/L的盐碱溶液来模拟盐碱环境。

1.2.2　*正式试验*　选择长势一致并且生长健壮的万寿菊进行处理，共设置6个处理，每个处理重复3次，每个重复15株。分别以CK（去离子水）、T1（盐碱胁迫）、T2（盐碱胁迫＋50 μmol/L H_2O_2）、T3（盐碱胁迫＋100 μmol/L H_2O_2）、T4（盐碱胁迫＋200 μmol/L H_2O_2）和T5（盐碱胁迫＋300 μmol/L H_2O_2）代表各处理。盐碱溶液和H_2O_2溶液采用根灌的方式进行施加，每盆施用盐碱液（100 mL）和H_2O_2溶液（20 mL）共120 mL，每隔1 d浇灌，于每天17∶00分别浇灌盐碱和H_2O_2溶液1次，共浇3次。在盆栽下铺设圆形托盘以防止溶液流失。

1.3　测定指标与方法

1.3.1　*叶绿素荧光参数及叶绿素含量的测定*　叶绿素荧光参数采用Yaxin-1105便携式光合荧光仪在胁迫后的第5、10、15和20天上午9∶00－11∶00，选取植株顶端往下选取第2个成熟叶片进行测定，重复3次。

1.3.2　*生理指标的取样*　分别在盐碱胁迫5、10、15和20天取样，在各处理的花盆内随机选取10株长势相似的万寿菊植株采集每个处理万寿菊顶花向下第3至4片发育成熟的完整复叶，每株取1片叶，将10株万寿菊叶片混合后记为1个重复，每组共3个重复。所取叶片样品立即用液氮冷冻后放置于－80 ℃超低温冰箱进行保存，以便后续进行生理指标测定。

1.3.3　*生理指标的测定*　叶绿素含量采用丙酮提取法测定[30]；REC用电导仪法进行测定[31]；MDA含量用硫代巴比妥酸法测定[32]；SOD酶活性采用氮蓝四唑光化还原法测定[33]；POD酶活性采用愈创木酚显色测定[34]；可溶性糖（SS）含量采用蒽酮比色法测定[35]；游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法测定[36]。

1.3.4　*根系构型参数的测定*　根系构型参数使用MRS-9600TFU2L MICROTEK扫描仪测量总根长

(RL)、总根表面积积(SA)、根尖数(RT)和根平均直径(RD)。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2022对数据进行整理,使用SPSS 24进行单因素方差分析,采用Duncan法进行多重比较,并以$P<0.05$作为差异显著性标准。最后使用Origin 2022进行绘图。

2 结果与分析

2.1 外源H_2O_2对盐碱胁迫下万寿菊生长表型的影响

盐碱胁迫导致万寿菊均出现了不同程度叶片萎蔫卷曲、叶片变薄并且生长受限(图1)。经过外源H_2O_2处理后,叶片萎蔫现象均有所缓解,其中T4处理缓解效果最显著,具体表现为叶片恢复挺立,颜色鲜绿,叶片呈现健康的状态。

图1 外源H_2O_2处理下盐碱胁迫的万寿菊生长表型变化

Fig. 1 Growth phenotypic changes of marigold under saline-alkali stress treated with exogenous H_2O_2

2.2 外源H_2O_2对盐碱胁迫下万寿菊根系形态参数的影响

在盐碱胁迫至20天时,T1处理与CK处理对比其根系长度差异性较大,根系分支角度不合理,说明盐碱胁迫对植物根系形态有严重的损害(图2)。相反,T4处理长势最好,根系粗壮、根毛旺盛,能够更好的利用养分和水分进行生长代谢,说明200 μmol/L H_2O_2能够更好地缓解盐碱胁迫对植物根系的侵害,相较于其它处理更能缓解盐碱胁迫对于植物根系形态特征的不利影响。

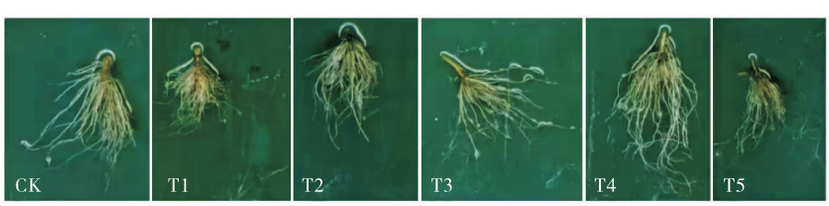

图2 外源H_2O_2处理下盐碱胁迫的万寿菊根系生长变化

Fig. 2 Changes of root growth of marigold under saline-alkali stress under exogenous H_2O_2 treatment

盐碱胁迫显著抑制根系的生长,而适量施加外源H_2O_2能够增加盐碱胁迫下万寿菊的RL、SA、RT和RD(表1)。其中,胁迫处理20天时,与CK处理相比,T1处理万寿菊的RT、RL、RD和SA分别降低23.34%、27.50%、28.49%和11.16%。随着外源H_2O_2浓度的增加,万寿菊根系的RT、RL、RD和SA均呈先升后降的变化趋势,并均在外源H_2O_2为200 μmol/L时(T4)时达到最大,此时比单盐碱处理(T1)分别显著提高23.30%、29.64%、34.91%和9.42%;可见,盐碱胁迫抑制了万寿菊根系的生长,施加外源H_2O_2对盐碱胁迫下万寿菊根系生长有显著促进效应,改善了万寿菊根系的生长状况(图2),缓解了盐碱对万寿菊根系生长的胁迫。

2.3 外源H_2O_2对盐碱胁迫下万寿菊叶片叶绿素含量的影响

随着盐胁迫时间增加,万寿菊的Chla含量逐渐降低,而外源H_2O_2处理后则显示出不同程度的缓解效应,且受浓度影响显著(图3-A)。胁迫至20天时,各处理的Chla含量达到最低值,且随外源H_2O_2浓度的增加,万寿菊叶片Chla含量呈先升后降的趋势。T1~T5处理分别较CK处理降低32.51%、26.78%、18.28%、12.75%和27.64%。

随着盐碱胁迫时间的延长,万寿菊叶片的Chl b含量与Chla含量变化趋势相同(图3-B)。盐碱胁迫抑制Chl a和Chl b含量,外源H_2O_2处理缓解盐碱胁迫对万寿菊的损害。胁迫至20天时,各处理的Chl b含量

表 1　外源 H_2O_2 对盐碱胁迫下万寿菊根系构型参数的影响

Table 1　Effects of exogenous H_2O_2 on root architecture parameters of marigold under salt-alkali stress

指标	时间/d	CK	T1	T2	T3	T4	T5
RT	5	222.30±15.46^{a}	140.00±19.04^{d}	170.33±12.85^{d}	192.33±15.68^{c}	218.67±4.16^{b}	217.67±15.70^{b}
	10	306.00±17.32^{a}	194.66±19.98^{f}	194.33±13.31^{e}	199.00±13.86^{d}	254.00±17.79^{b}	217.33±19.93^{c}
	15	358.00±11.19^{a}	241.66±11.00^{f}	277.66±22.43^{e}	263.00±20.00^{d}	321.00±10.50^{b}	274.00±20.21^{c}
	20	482.00±1.43^{a}	344.66±22.80^{e}	373.33±17.30^{d}	441.67±16.29^{c}	465.00±20.5^{1b}	441.00±17.69^{c}
RL	5	121.81±4.37^{a}	101.30±4.60^{d}	106.03±4.87^{c}	112.55±4.29^{b}	119.55±3.98^{ab}	100.51±3.92^{d}
	10	141.69±3.97^{a}	110.54±5.92^{bc}	128.85±4.42^{b}	130.19±5.21^{b}	138.19±3.59^{a}	105.19±4.03^{c}
	15	150.07±3.84^{a}	122.88±4.06^{bc}	138.88±4.75^{c}	144.88±3.97^{b}	148.26±3.95^{a}	115.90±4.24^{d}
	20	159.08±4.23^{a}	121.95±3.92^{d}	138.36±4.67^{b}	144.36±3.78^{b}	150.37±4.16^{ab}	119.16±4.00^{d}
RD	5	0.64±0.00^{a}	0.52±0.01^{c}	0.56±0.01^{ab}	0.55±0.01^{abc}	0.58±0.00^{b}	00.53±0.00^{bc}
	10	0.66±0.01^{a}	0.52±0.00^{d}	0.60±0.00^{ab}	0.57±0.01^{c}	0.61±0.00^{b}	00.56±0.01^{c}
	15	0.68±0.00^{a}	0.60±0.00^{c}	0.65±0.00^{b}	0.63±0.00^{bc}	0.66±0.00^{ab}	00.62±0.00^{bc}
	20	0.71±0.00^{a}	0.63±0.00^{c}	0.67±0.00^{b}	0.66±0.01^{bc}	0.70±0.01^{ab}	00.64±0.00^{bc}
SA	5	44.82±2.10^{a}	30.33±2.91^{cd}	34.19±2.86^{c}	36.95±1.41^{ab}	40.24±1.34^{ab}	32.42±1.94^{c}
	10	47.98±1.14^{a}	32.05±2.20^{c}	36.72±1.75^{b}	39.95±1.45^{ab}	42.32±2.32^{ab}	34.66±2.28^{b}
	15	49.26±1.47^{a}	35.88±1.19^{b}	37.94±1.31^{b}	39.44±1.02^{b}	44.72±1.71^{ab}	36.14±1.94^{b}
	20	50.47±2.29^{a}	36.59±1.40^{c}	40.10±2.37^{b}	42.76±2.23^{ab}	47.44±2.24^{ab}	39.58±2.12^{b}

注：RT 根尖数，RL 总根长，RD 根系平均直径，SA 总根表面积，CK 去离子水，T1 盐碱胁迫，T2 盐碱胁迫＋50 μmol/L H_2O_2，T3 盐碱胁迫＋100 μmol/L H_2O_2，T4 盐碱胁迫＋200μmol/L H_2O_2，T5 盐碱胁迫＋300 μmol/L H_2O_2，表中同一行内不同小写字母表示代表各处理间差异显著（$P<0.05$），下表同。

达到最低值。其中，T4 处理较 CK 处理降幅最小，仅为 13.92%。

外源 H_2O_2 处理后，万寿菊叶片的 Chl（a＋b0 含量变化趋势与 Chl a 和 Chl b 相似，均呈现不同程度的缓解趋势，并受到外源 H_2O_2 浓度的明显影响（图 3-C）。经过 20 天盐碱混合胁迫，各处理的 Chl（a＋b）含量达到最低值，分别较 CK 处理降低 37.96%、30.22%、24.61%、13.26% 和 35.90%，T4 处理较 CK 处理降幅最小，仅为 13.26%。

2.4　外源 H_2O_2 对盐碱胁迫下万寿菊叶片荧光参数的影响

万寿菊叶片的 F_o 随盐碱胁迫时间的延长而不断降低。但不同处理对不同时间的叶片 F_o 变化影响不同，各处理的叶片 F_o 表现出随外源 H_2O_2 浓度增加呈先升后降的趋势，胁迫 20 天时，T1～T5 处理分别较 CK 处理降低 34.76%、31.44%、20.06%、14.06% 和 21.43%。T4 处理降幅最低，为 14.06%，说明 200 μmol/L 的 H_2O_2 可以显著降低盐碱胁迫对万寿菊叶片 F_o 的影响（图 4-A）。

随着盐碱胁迫时间的增加，万寿菊叶片的 F_o 和 F_m 呈现相似的变化趋势，但不同处理条件下对 F_m 的下降幅度有所差异。胁迫 20 天时，F_m 在各处理下均显著低于对照（图 4-B）。与对照相比，T4 处理（2.84%）降幅最小，显著小于 T1（24.42%）、T2（13.66%）、T3（9.11%）和 T5 处理（16.12%）。

随着盐碱胁迫时间的延长，5～20 天万寿菊叶片的 F_v/F_m 含量下降趋势并不明显，但在外源 H_2O_2 处理后，各处理条件下的 F_v/F_m 均呈现先升后降的趋势，且受外源 H_2O_2 浓度影响显著（图 4-C）。胁迫至 20 天时，各处理的 F_v/F_m 含量达到最低值。T1～T5 处理分别较 CK 处理降低 35.51%、29.30%、12.49%、4.69% 和 28.43%。其中 T1 处理降幅最大，为 35.51%，而 T4 处理降幅最低，仅为 4.69%，说明适宜浓度的 H_2O_2 可以有效缓解盐碱胁迫所带来的影响。

2.5　外源 H_2O_2 对盐碱胁迫下万寿菊 REC 和 MDA 的影响

随着盐碱胁迫时间的延长，万寿菊叶片的 REC 含量呈持续上升的趋势（图 5-A）。外源 H_2O_2 处理后，各处理条件下的 REC 含量均呈现不同程度的缓解趋势，并且受到外源 H_2O_2 浓度影响明显。经过 20 天胁迫，

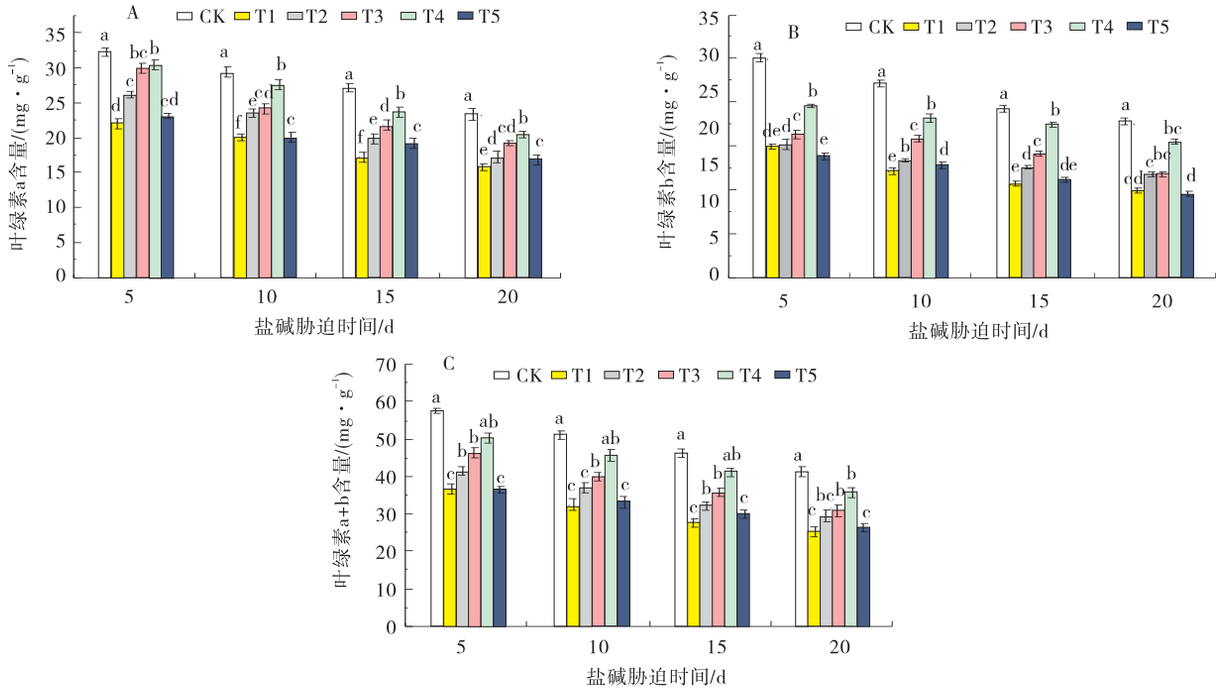

图3 外源H_2O_2处理下盐碱胁迫的万寿菊叶绿素含量变化

Fig. 3 Changes of chlorophyll content of marigold under salt-alkali stress under exogenous H_2O_2 treatment

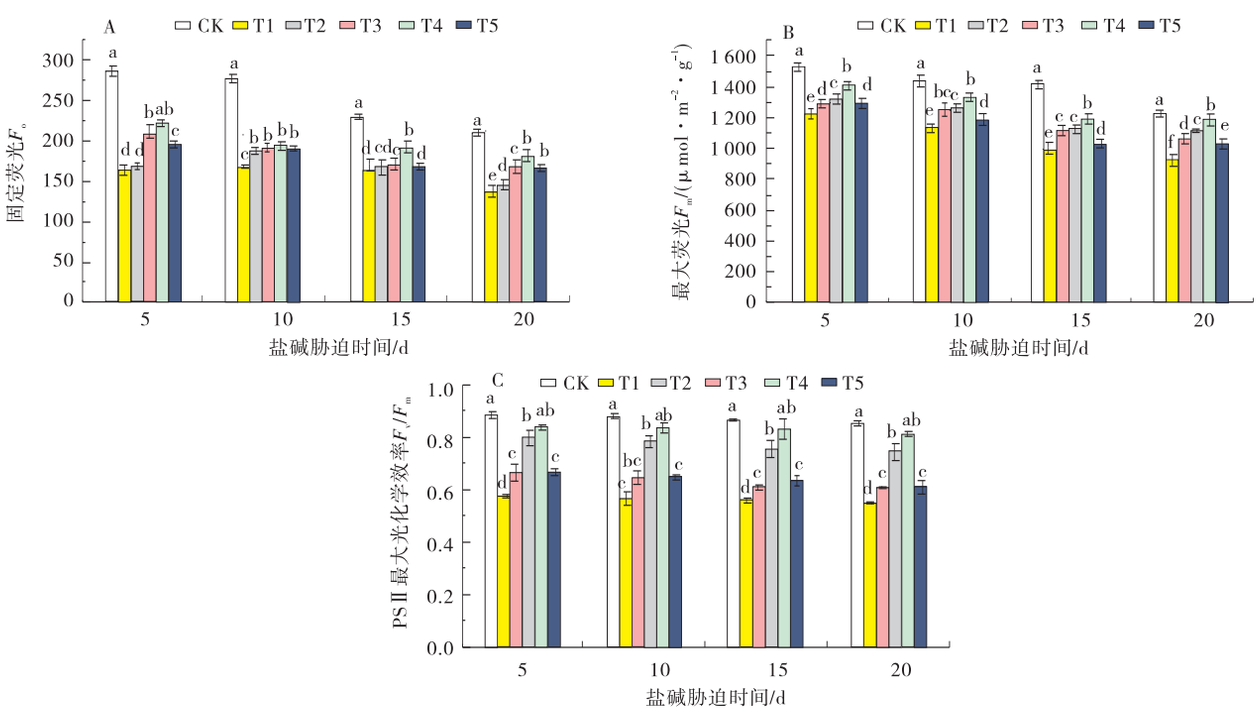

图4 外源H_2O_2处理下盐碱胁迫的万寿菊荧光参数变化

Fig. 4 Changes of fluorescence parameters of marigold under saline-alkali stress under exogenous H_2O_2 treatment

各处理的REC含量达到峰值,且随着H_2O_2浓度的增加呈现先下降后上升的趋势。其中T1处理涨幅最大,高达45.77%,说明盐碱胁迫对万寿菊叶片的细胞膜进行了破坏,使膜通透性增大、电解质外渗。而T4处理增幅最低,仅为3.19%,说明200 μmol/L的H_2O_2可以显著缓解盐碱胁迫对万寿菊叶片细胞膜的影响。

万寿菊叶片中MDA与REC的含量随盐胁迫时间的增加而变化趋势基本一致,但二者的升幅存在一定的差异(图5-B)。胁迫至20天时,各处理的MDA含量达到峰值,分别较CK增加1.96、1.03、0.93、0.78和0.9倍。T4处理增幅最小,为78.84%,说明H_2O_2缓解了盐碱胁迫下万寿菊的膜脂抗氧化程度,增加了

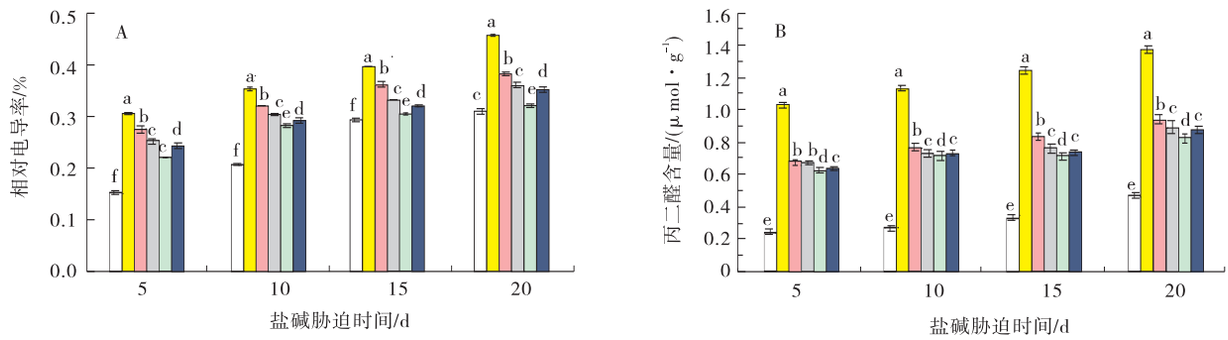

图 5　外源 H_2O_2 处理下盐碱胁迫的万寿菊 REC 和 MDA 变化

Fig. 5　Changes of REC and MDA of marigold under saline-alkali stress under exogenous H_2O_2 treatment

万寿菊在盐碱胁迫下的抗逆性。

2.6　外源 H_2O_2 对盐碱胁迫下万寿菊叶片渗透物质的影响

随着盐碱胁迫时间的延长，万寿菊的 Pro 含量呈现持续上升的趋势（图 6-A）。外源 H_2O_2 处理后，万寿菊叶片的 Pro 含量呈先升后降的趋势，并且存在明显的浓度效应。胁迫至 20 天时，各处理的 Pro 含量达到峰值，分别为 94.128、282.106、301.304、320.184、337.442 和 318.787 mg/g。与 CK（94.128 mg/g）处理对比，T4 处理增幅最高，为 258.49%，说明 200 μmol/L 的 H_2O_2 可以有效促进盐碱胁迫下万寿菊 Pro 的积累，抵御逆境，促进植物正常发育。

随着盐碱胁迫时间的延长，万寿菊叶片的 SS 含量和 Pro 含量变化呈现一致的趋势，但不同处理下 SS 含量的升幅不同（图 6-B）。胁迫 20 天时，SS 含量达到峰值，T1～T5 处理分别为：6.2、7.756、8.223、9.014、9.714 和 9.314 mg/g。与 CK（6.2 mg/g）处理对比，T4 处理增幅最高，为 56.68%，说明 200 μmol/L 的 H_2O_2 可以促进盐碱胁迫下万寿菊叶片 SS 含量的积累，为植物抵御逆境，提供更多营养物质。

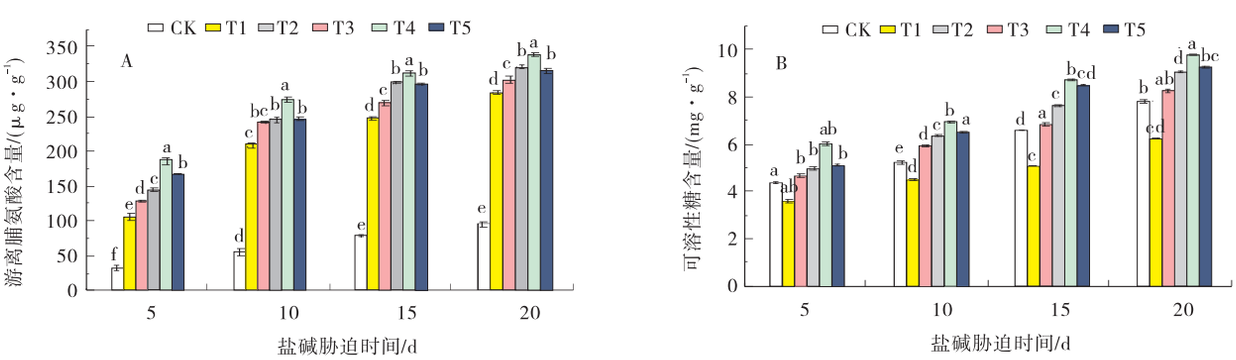

图 6　外源 H_2O_2 处理下盐碱胁迫的万寿菊叶片渗透物质变化

Fig. 6　Changes of osmotic substances in marigold leaves under salt-alkali stress under exogenous H_2O_2 treatment

2.7　外源 H_2O_2 对盐碱胁迫下万寿菊叶片抗氧化酶活性的影响

随着盐碱胁迫时间的延长，万寿菊的 POD 活性呈现持续上升的趋势（图 7-A）。外源 H_2O_2 处理后，万寿菊叶片各处理的 POD 活性呈先升后降的趋势；胁迫至 15 天时，不同处理下万寿菊叶片 POD 活性显著升高，胁迫至 20 天时，POD 活性达到峰值，分别为 344.228、365.46、426.56、437.44、441.56 和 418.22 U/g。其中 T4 处理 POD 活性较 CK 处理升幅最高，为 28.28%。

随着盐碱胁迫时间的延长，万寿菊叶片 SOD 变化趋势与 POD 一致（图 7-B）。胁迫至 20 天时，SOD 活性达到峰值，分别为 266.76、280.41、298.28、306.82、316.74 和 278.83 U/g。其中 T4 处理 SOD 活性较 CK 处理升幅最高，为 18.74%。

2.8　不同浓度 H_2O_2 处理对万寿菊生理特性的综合评价

2.8.1　相关性分析　将经过盐碱胁迫处理的万寿菊叶片的 16 个生理特性的指标进行相关性分析（表 2）。万寿菊叶片中的 Chl a 与 Chl b、Chl（a+b）、RL、SA、RD、F_v/F_m 和 F_m 均极显著正相关（$P<0.01$），与 RT、

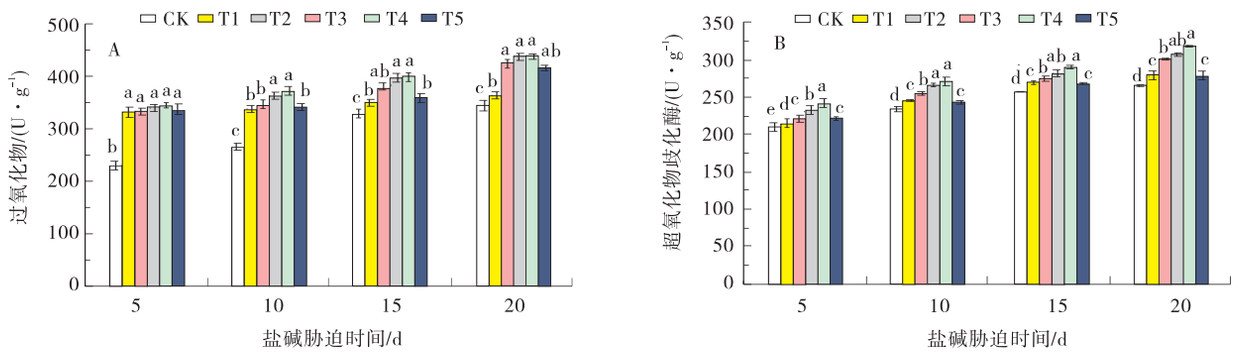

图7 外源H_2O_2处理下盐碱胁迫的万寿菊抗氧化酶活性变化

Fig. 7 Changes of antioxidant enzyme activity of marigold under saline-alkali stress under exogenous H_2O_2 treatment

F_o呈现显著正相关($P<0.05$),与REC、MDA呈现显著负相关($P<0.05$)。

2.8.2 主成分分析 经过胁迫处理后的16个生理特性指标进行主成分分析,提取了2个特征值大于1的主成分,分别为11.739和3.209(表3)。第1、2主成分的方差贡献率分别是73.368%、20.054%,累积方差贡献率达到93.423%,符合方差分析的要求。由表2可知,第1主成分(PC1)是Chl a、Chl b、Chl(a+b)、RL、RD等生理特性指标的综合,第二主成分(PC2)是REC、SS、SOD、POD等生理特性指标的综合。

综合得分(F)是每个主成分的相应得分乘以相对应的方差贡献率的和(表4)。$F=F1\times73.368\%+F2\times20.054\%$。万寿菊在不同处理下的的综合得分分别是1.071(CK)、-1.005(T1)、-0.314(T2)、0.076(T3)、0.640(T4)、-0.467(T5)。因此盐碱胁迫下不同浓度梯度的外源H_2O_2对万寿菊生理特性指标的影响的综合效果排名为CK>T4>T3>T2>T5>T1。

3 讨论

叶绿素是植物叶绿体内的关键色素,它能促进植物合成有机物,释放氧气、保护叶片免受过量光能损害,并在光合作用的反应中心中发挥作用[37]。因此,叶绿素对植物的生长和农作物产量形成起着至关重要的作用。研究发现,在盐胁迫下,植物叶绿素合成受到抑制,植物叶绿素合成的前体物质含量降低,同时叶绿素酶的活性增加,导致叶绿素的降解代谢加速,最终导致叶绿素含量下降[38-40]。本试验中,随着盐碱胁迫持续时间的延长,万寿菊叶片叶绿素的含量逐渐降低,这可能是盐碱胁迫破坏叶绿素的超微结构,同时会增加叶绿素酶的活性,从而导致光合色素含量下降,进而影响植物的光合能力[41]。经过外源H_2O_2处理后,叶绿素含量较T1处理增加,表明外源H_2O_2能够缓解万寿菊叶绿体受盐碱胁迫损伤,降低盐碱胁迫对叶绿素结构的损害,这与卢金等[42]的研究结果类似。

叶绿素荧光参数是反映植物光合作用状态和效率的重要信息。可以反映光合机构状况,研究光合作用的调控机制,因此,被称为植物光合作用的探针[43]。刘建新等[44]研究发现,在Cd胁迫下,外源H_2O_2喷施被发现可以减轻Cd胁迫对裸燕麦叶片PSⅡ反应中心的光抑制。这意味着H_2O_2的喷施可以提高PSⅡ电子传递速率和光能转换效率。这与Nobakht等[45]在干旱胁迫下薄荷喷施外源H_2O_2可提高光合活性研究结果相似。本研究表明,在盐碱胁迫下,F_o(最小荧光)、F_m(最大荧光)和F_v/F_m(最大光化学效率)与CK处理对比均呈现显著下降趋势,这可能是盐碱胁迫下,万寿菊叶片光合机构受到了损伤,PSII光能转化效率受到了抑制。在经过外源H_2O_2处理后,F_o、F_m和F_v/F_m的含量较T1处理增加,表明外源H_2O_2能够增加F_o和F_v/F_m在暗反应下PSII的光能转化效率,提升叶绿素的光合效率和荧光水平,说明外源H_2O_2能够缓解逆境情况下的光抑制状态。

植物细胞膜是渗透调节的重要结构,它能够维持植物细胞内外渗透压的平衡,保护细胞免受逆境胁迫[46]。REC和MDA含量的升高反映了植物细胞膜在盐碱胁迫下的受损程度。研究表明,盐碱胁迫会引起植物细胞膜受损,导致细胞膜通透性增加,电解质外

表 2　不同处理下万寿菊叶片各项指标的相关性分析

Table 2　Correlation analysis of various indexes of marigold leaves under different treatments

	Chl a	Chl b	Chl(a+b)	REC	SS	pro	RL	RD	RT	SA	F_o	F_v/F_m	F_m	SOD	POD	MDA
Chl a	1															
Chlb	0.969**	1														
Chl(a+b)	0.992**	0.993**	1													
REC	−0.870*	−0.855*	−0.869*	1												
SS	−0.258	−0.395	−0.330	0.144	1											
Pro	−0.516	−0.651	−0.590	0.481	0.930**	1										
RL	0.953**	0.896*	0.931**	−0.691	−0.227	−0.409	1									
RD	0.932**	0.946**	0.947**	−0.862*	−0.404	−0.642	0.864*	1								
RT	0.867*	0.876*	0.878*	−0.989**	−0.126	−0.474	0.686	0.860*	1							
SA	0.990**	0.989**	0.997**	−0.902*	−0.306	−0.582	0.911*	0.950**	0.910*	1						
F_o	0.874*	0.919**	0.904*	−0.939**	−0.450	−0.739	0.700	0.888*	0.938**	0.924**	1					
F_v/F_m	0.968**	0.920**	0.951**	−0.894*	−0.078	−0.378	0.891*	0.839*	0.898*	0.958**	0.852*	1				
F_m	0.982**	0.975**	0.986**	−0.915*	−0.347	−0.614	0.898*	0.974**	0.908*	0.991**	0.932**	0.931**	1			
SOD	−0.336	−0.509	−0.428	0.383	0.915*	0.969**	−0.194	−0.503	−0.389	−0.428	−0.650	−0.210	−0.460	1		
POD	0.077	−0.093	−0.010	0.121	0.791	0.771	0.249	−0.139	−0.108	−0.026	−0.354	0.176	−0.081	0.888*	1	
MDA	−0.854*	−0.825*	−0.846*	0.959**	0.303	0.584	−0.698	−0.890*	−0.915*	−0.875*	−0.926**	−0.825*	−0.918**	0.468	0.230	1

注：* 表示相关性显著（$P<0.05$）。** 表示相关性极显著（$P<0.01$）。

表3 主成分分析及方差分析

Table 3 Principal components analysis and analysis of variance

指标	载荷	
	PC1	PC2
Chl a	0.961	0.233
Chl b	0.979	0.057
Chl(a+b)	0.978	0.144
REC	−0.920	−0.152
SS	−0.420	0.840
Pro	−0.690	0.712
RL	0.853	0.323
RD	0.962	0.027
RT	0.917	0.161
SA	0.985	0.149
F_o	0.967	−0.131
F_v/F_m	0.912	0.364
F_m	0.992	0.102
SOD	−0.554	0.826
POD	−0.188	0.948
MDA	−0.920	−0.017
特征根	11.739	3.209
方差贡献率/%	73.368	20.054
累计方差贡献率/%	73.368	93.423

注:PC1、PC2分别表示主成分1、主成分2,下同。

表4 不同处理下万寿菊的综合得分及排名

Table 4 Comprehensive score and ranking of marigold under different treatments

处理	主成分得分		综合得分(F)	综合得分排名
	PC1(F1)	PC2(F2)		
CK	1.282	−0.210	1.071	1
T1	−0.807	−0.198	−1.005	6
T2	−0.305	−0.008	−0.314	4
T3	−0.069	0.146	0.076	3
T4	0.333	0.307	0.640	2
T5	−0.432	−0.034	−0.467	5

渗,相对电导率上升[47]。同时,膜脂过氧化作用增强,产生丙二醛,进一步加剧细胞膜的损伤[48]。刘建新等[49]研究发现,在盐碱胁迫下,外源H_2O_2可以促进裸燕麦幼苗生长,促进抗氧化物质和渗透调节物质的积累,进而可以提高裸燕麦对盐碱胁迫的适应能力。本研究表明,盐碱胁迫下,REC和MDA含量与CK处理对比,呈现显著升高的趋势。在施加外源H_2O_2之后,与T1处理对比,其REC和MDA含量显著降低,说明外源H_2O_2会缓解盐碱胁迫引起的细胞膜系统的损害。这与刘建新等[49]在裸燕麦上的研究结论相似。

植物中的Pro是一种重要的氨基酸,在逆境中会帮助维持细胞渗透压,促进正常生长和发育,并提高植物的抗逆性[50]。任艳芳等[16]研究发现,使用10 mmol/L浓度的H_2O_2处理能够更好地缓解盐胁迫对小白菜种子发芽和幼苗生长的抑制,有助于增加植物体内脯氨酸和可溶性糖的含量,同时降低盐分在植物体内的积累。在本研究中,随盐碱胁迫时间延长,盐碱胁迫与CK处理对比,Pro的含量显著上升,说明盐碱胁迫使其细胞膜渗透压失衡。在通过不同浓度的H_2O_2处理后,其Pro含量显著高于CK处理和盐碱处理,这可能说明,在盐碱胁迫下,外源施加H_2O_2会使Pro大量累积,以此来应对盐碱胁迫对于细胞膜的损害。这与任艳芳等[16]和丁亮等[51]研究结果类似,为我们深入了解万寿菊抗盐碱胁迫提供了新的视角。可溶性糖是植物合成有机物的能源来源,通过检测其含量可以间接评估环境对植物的胁迫程度[52]。李健等[53]研究发现,叶面喷施H_2O_2可以帮助桑树在干旱条件下正常生长,促进叶片积累更多可溶性糖,减少丙二醛(MDA)的含量。本研究表明,随盐碱胁迫时间增加,万寿菊叶片SS含量显著降低;而经过外源H_2O_2处理后,其可溶性糖含量较盐碱胁迫显著增加,这表明H_2O_2可以缓解盐碱胁迫对植物的损害,增加可溶性糖含量,提升植物对于逆境环境中的抗性,这与李健等[53]研究结果一致。

抗氧化酶活性指的是植物体内抗氧化酶(如SOD、CAT和POD)的活动水平[54]。这些酶的作用是保护植物免受活性氧的伤害,特别是在面对干旱[55]、高温[56]、低温[57]等逆境条件时。因此,抗氧化酶活性的变化可以作为评估植物适应逆境条件能力的指标之一。李伟等[58]研究表明,外源0.05 mmol/L H_2O_2的施用可以显著提高羽衣甘蓝幼苗体内的SOD、APX和CAT活性水平,从而缓解了盐胁迫对羽衣甘蓝幼苗生长的抑制作用。本研究发现,在盐碱胁迫下,万寿菊叶片SOD和POD酶活性较CK处理显著上升,说明在盐碱胁迫下植物激活抗氧化酶来抵御逆境胁迫,

这与王志科等[18]结论类似。而外源H_2O_2处理的万寿菊POD和SOD酶活性显著增加，说明外源H_2O_2可以增加植物的抗氧化酶活性，提高植物抗氧化能力并且增强植物在逆境下的抗性。

植物根系生长对植物生长和发育有重要影响，植物根系生长良好可以增加水分吸收、促进养分吸收、增强抗逆性、促进地上部分生长、提高产量和品质等诸多有利影响[59]。董玉等[60]研究表明，适量浓度(10～50 mmol/L)的外源H_2O_2对切除主根后的黄瓜幼苗具有促进不定根再生的作用，可显著增加不定根数量和鲜重。伍小兵等[61]研究发现，0.5和2.5 mmol/L的较低浓度H_2O_2处理可以促进甘薯幼苗不定根生长，其中0.5 mmol/L的处理效果最为显著；而当浓度达到5 mmol/L时则表现出明显的抑制作用。H_2O_2对植物不定根发育和根毛形成具有双重作用，既有毒害作用也有保护作用，这取决于H_2O_2的浓度。本研究发现，盐碱胁迫下，万寿菊根系生长的各个参数均显著低于对照组，说明盐碱胁迫显著影响了根系生长，这与王晗昕等[62]研究结果类似，而在外源施加H_2O_2后，其各处理根系参数均有增加，尤以T4(200 μmol/L)处理为最佳，但是T5(300 μmol/L)处理与盐碱胁迫相比增加不显著，说明过量的H_2O_2对其植物有毒害作用，这与伍小兵等[61]研究结果一致。

植物对盐碱胁迫的响应是一个极其复杂的生理生化过程，单一指标不足以全面评价其植物的抗盐碱性[63]。为了全面评估H_2O_2在盐碱胁迫下对万寿菊的调控作用，本研究采用主成分分析法对6个处理组的16个指标进行了综合评价。使用SPSS 24软件进行数据分析，结果显示2个主成分(PC1和PC2)的贡献率分别为73.368%和20.054%，累积贡献率为93.423%。主成分分析表明，万寿菊的根系构型参数、叶绿素含量和叶片荧光参数对H_2O_2缓解盐碱胁迫的效果敏感，适合作为筛选指标。基于这些分析，确定了200 μmol/L为万寿菊在盐碱胁迫条件下施用H_2O_2的最佳浓度。

4　结论

盐碱胁迫下，外源H_2O_2能提高万寿菊的叶绿素含量、荧光参数、根系构型参数，降低渗透调节物质，促进抗氧化酶(SOD、POD)活性，有助于缓解盐碱胁迫对万寿菊生长的抑制作用。从主成分分析的排名结果看，200 μmol/L外源H_2O_2对万寿菊盐碱胁迫的缓解能力最为显著。

参考文献：

[1] 李彬，王志春，孙志高，等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究，2005(2)：154－158.

[2] 江杰，王胜. 我国盐碱地成因及改良利用现状[J]. 安徽农业科学，2020，48(13)：85－87.

[3] 樊自立，马英杰，马映军. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用[J]. 干旱区研究，2001(3)：1－6.

[4] 王佺珍，刘倩，高娅妮，等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报，2017，37(16)：5565－5577.

[5] 江香梅，黄敏仁，王明庥. 植物抗盐碱、耐干旱基因工程研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2001(5)：57－62.

[6] 牛东玲，王启基. 盐碱地治理研究进展. 土壤通报[J]，2002(6)：449－455.

[7] Ahmad M，Muralip. Exogenous jasmonic acid alleviates adverse effects of drought stress in*Allium cepa* L[J]. International Journal of Geology，Agriculture and Environmental Sciences 2015(3)：10－18.

[8] He Y，Liu Y，Cao W，*et al*. Effects of salicylic Acid on heat tolerance associated with antioxidant metabolism in Kentuckybluegrass[J]. Crop Science，2005，45(3)：988－995.

[9] 林先玉，柏松，李美玉，等. 外源脱落酸对干旱胁迫下云南山茶光合与荧光指标的影响[J/OL]. 分子植物育种，1－12 [2025－05－21]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/46.1068.S.20230524.1453.018.html.

[10] 贾红磊，王晴，陈翠，等. 外源硫对Cd胁迫下番茄植株生长及抗逆代谢的影响[J]. 陕西科技大学学报，2024，42(1)：19－27＋44.

[11] Baabusta M，Szafranska K，Posmyk M M. Exogenous melatonin improves antioxidant defense in cucumber seeds (*Cucumis sativus* L.) germinated under chilling stress [J]. Frontiers in Plant Science，2016，7：575.

[12] Zhang Y，Han X，Chen X，*et al*. Exogenous nitric oxide on antioxidative system and ATP activities from tomato seedlings under copper stress[J]. Scientia Horticulturae，2009，123(2)：217－223.

[13] 赖秋洁. 外源H_2O_2预处理对垂盆草抗寒抗旱性及其药材产量和品质的影响[D]. 南京：南京农业大学，2021.

[14] Hossain M A. Hydrogenperoxide priming stimulates

drought tolerance in mustard(*Brassica juncea* L.) Seedlings[J]. Plant Gene & Trait,2013,4:109－123.

[15] 徐芬芬,徐鹏,胡志涛,等. 外源过氧化氢对盐胁迫下水稻幼苗根系生长和抗氧化系统的影响[J]. 杂交水稻,2017,32(1):74－77.

[16] 任艳芳,何俊瑜,杨军,等外源H_2O2对盐胁迫下小白菜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报,2019,39(20):7745－7756.

[17] 刘建新,欧晓彬,王金成,等. 镉胁迫下裸燕麦幼苗对外源H_2O_2的生理响应[J]. 草业学报,2020,29(1):125－134.

[18] 王志科. 外源过氧化氢对NaCl胁迫下玉米种子萌发和幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 陕西农业科学,2023,69(5):1－6.

[19] 刘建新,王金成,刘秀丽,等. 外源H_2O_2对混合盐碱胁迫下燕麦幼苗叶片脯氨酸积累和代谢途径的影响[J]. 植物研究,2016,36(3):427－433.

[20] 范敏,向世鹏,许金亮,等. 外源表油菜素内酯和过氧化氢对低温处理后湘烟号幼苗生理特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(4):401－406.

[21] 刘忠静,郭延奎,林少航,等. 外源过氧化氢对干旱胁迫下温室黄瓜叶绿体超微结构和抗氧化酶的影响[J]. 园艺学报,2009,36(8):1140－1146.

[22] 张琳,蒋芳玲,熊超超,等. 外源H_2O_2作用下大蒜试管苗活性氧代谢的变化及对ASA的响应[J]. 园艺学报,2011,38(9):1707－1716.

[23] 赵光宇. 过氧化氢与菌肥联用对连作平邑甜茶幼苗影响的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2023.

[24] Silva,A A R D,Lima G S D,Azevedo C A V D,*et al*. Gas exchanges and growth of passion fruit seedlings under salt stress and hydrogen peroxide[J]. Pesquisa Auricularia Tropical, 2019, 49(4). doi: https://doi. org/10. 1590/1983－40632019v4955671.

[25] Novkovic V M, Stoiljkovic Z, Stankovicmz. Determination of total lipids and characterization of marigold flower extracts(*Calendula officinalis*)[J]. Hemi ska Industrija, 2005,59(9/10):254－258.

[26] Vermapk, Raina R, Agarwal S, *et al*. Phytochemical ingredients and pharmacological potential of *Calendula officinalis Linn* [J]. Pharmaceutical and Biomedical Research,2018,4(2):1－17.

[27] Petrovic L, Lepojevicz, Svoilj V, *et al*. An investigation of CO_2 extraction of marigold(*Calendula officinalis* L)[J]. Journal of the Serbian Chemical Society, 2007, 72(4):407－413.

[28] 韦朝妹,胡小京,莫幻. 外源赤霉素对盐胁迫下万寿菊种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 北方园艺,2022(16):69－75.

[29] 魏嘉,蔡勤安,李源,等. 植物对盐碱胁迫响应机制的研究进展[J]. 山东农业科学,2022,54(4):156－164.

[30] 邱念伟,王修顺,杨发斌,等. 叶绿素的快速提取与精密测定[J]. 植物学报,2016,51(5):667－678.

[31] 陈刚,李胜. 植物生理学试验[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

[32] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯,1994(3):207－210.

[33] 黎瑞珍,杨庆建,陈贻锐. 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定及其应用研究[J]. 琼州大学学报,2004(5):34－36.

[34] 王伟玲,王展,王晶英. 植物过氧化物酶活性测定方法优化[J]. 试验室研究与探索,2010,29(4):21－23.

[35] 丁雪梅,张晓君,赵云,等. 蒽酮比色法测定可溶性糖含量的试验方法改进[J]. 黑龙江畜牧兽医,2014(23):230－233.

[36] 朱广廉,邓兴旺,左卫能. 植物体内游离脯氨酸的测定[J]. 植物生理学通讯,1983(1):35－37.

[37] Fromme P, Melkozernov A, Jordan, *et al*. Structure and function of photosystem I:interaction with its soluble electron carriers and external antenna systems[J]. FEBS letters,2003,555:40－44.

[38] Hu K L, Zhang L, Wang J T, *et al*. Influence of selenium on growth, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activity in melon(*Cucumis melo* L.) seedlings under salt stress[J]. Acta Societies Botanic rum Polonia, 2013, 82(3):193－197.

[39] Naseer M N, Rahman F U, Hussain Z, *et al*. Effect of salinity Stress on germination, seedling growth, mineral uptake and chlorophyll contents of three cucurbitaceae species[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2022. doi: https://doi. org/10. 1590/1678－4324－2022210213.

[40] 孙聪,郭金丽. 盐胁迫下欧李叶片叶绿素代谢与超微弱发光的关系[J]. 果树学报,2023,40(7):1411－1420.

[41] 崔洪鑫,关思慧,柴亚倩,等. 土壤盐碱胁迫程度对番茄光合特性的影响[J]. 北方园艺,2023(17):15－24.

[42] 卢金,黄家钿,王艳芳,等. 外源H_2O_2处理对两种小麦叶

绿素荧光和叶绿素的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(1):9－11＋45.

[43] 张敏,李燕,宁朋,等. 叶面及根际施用外源NO对盐胁迫下中华常春藤生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报,2022,44(3):583－592.

[44] 刘建新,欧晓彬,王金成. 外源H_2O_2对镉胁迫下裸燕麦叶绿素荧光参数和镉积累特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(6):65－71.

[45] Nobakht P, Ebadi A, Parmoon G, *et al*. Effect H_2O_2 on fluorescence pigments photosynthetic, dry weight and some secondary metabolic Peppermint (*Mentha piperita* L.) in Water stress condition[C]. National Congress of Agricultural Engineering & Sciences to Develop & Promote Iranian Soil. 2016.

[46] Zheng Q, Liu Z, Cang G, *et al*. Comparison of osmotic regulation in dehydration and salinity stressed sunflower seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition, 2010, 33(7): 966－981.

[47] 贾文飞,魏晓琼,聂小兰,等. 盐碱胁迫对越橘生理特性及叶片解剖结构的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(5):115－126.

[48] 李嘉文,麻冬梅,苏立娜,等. 外源褪黑素对盐胁迫下燕麦幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 草地学报,2023,31(2):396－403.

[49] 刘建新,欧晓彬,王金成. 外源H_2O_2对盐碱混合胁迫下裸燕麦幼苗生长和抗性生理的影响[J]. 植物研究,2019,39(2):181－191.

[50] Jia X M, Wang H, Svetla S, *et al*. Comparative physiological responses and adaptive strategies of apple Malus halliana to salt, alkali and saline-alkali stress[J]. Scientia horticultural, 2019, 245: 154－162.

[51] 丁亮,张仲兴,高彦龙,等. 外源GABA对盐胁迫下苹果砧木B9幼苗光合荧光及生理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2023,58(4):116－126.

[52] Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice[J]. Biologic Plantarum, 2001, 44(1): 117－123.

[53] 李健,陈英,李琲,等. 叶面喷施过氧化氢对桑树抗旱生理的影响[J]. 南方农业,2021,15(34):79－83.

[54] 李璇,岳红,王升,等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志,2013,38(7):973－978.

[55] Gahininath J S. Effect of seed priming on osmolytes accumulation and antioxidant enzymes under drought stress in wheat[J]. Cell & developmental biology, 2020, 5.

[56] 史建硕,潘丽佳,蒋龙刚,等. 外源γ－氨基丁酸对高温胁迫下番茄幼苗生长、抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. 华北农学报,2023,38(S1):188－193.

[57] Radhaj, Srivastava S, Chandra A. Electrolyte and phenolic leakage contents and their relation with photosynthetic pigments, catalase, peroxidase and superoxide dismutase activities at low temperature stress in sugarcane[J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2012, 17 (3/4): 246－253.

[58] 李伟,郭君洁,李鸿雁. H_2O_2对盐胁迫下羽衣甘蓝幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):149－152.

[59] 苗宇,蒋舒蕊,赵凯,等. 不同植物生长调节剂对番茄种子萌发和根系生长的影响[J]. 现代园艺,2023,46(17):56－58.

[60] 董玉,孟宁,李师翁. H_2O_2对黄瓜不定根形成中抗氧化酶活性的影响[J]. 兰州交通大学学报,2007(6):140－144.

[61] 伍小兵. H_2O_2对甘薯幼苗不定根的生长和植株抗冷性的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2010.

[62] 王晗昕,王庆燕,刘繁超,等. 外源精氨酸对盐碱胁迫下绿豆苗期生长的调控效用[J]. 生态学杂志,2024,43(5):1263－1270.

[63] 王绮玉,刘欢,仁增旺堆,等. PEG渗透胁迫下藏沙蒿种质资源萌发特性及抗旱性评价[J]. 草原与草坪,2024,44(2):215－225.

Effects of exogenous H_2O_2 on photosynthetic capacity and resistance physiology of marigold under saline-alkali stress

ZHU Jin-wei, JIANG Qian*, ZHANG Wang-jun, LIU Xing, WANG Yan, XIAN Xu-lin

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

Abstract:【Objective】To investigate the effects of exogenous hydrogen peroxide (H_2O_2) on the photosynthetic characteristics and physiological functions of potted marigolds (Tagetes erecta) under mixed saline-alkaline stress, and to identify the optimal exogenous H_2O_2 concentration for enhancing stress resistance.【Method】Five concentrations of exogenous H_2O_2 were applied under control (CK) and mixed saline-alkaline stress conditions: T1 (0 μmol/L), T2(50 μmol/L), T3(100 μmol/L), T4(200 μmol/L) and T5(300 μmol/L). Phenotypic observations were recorded, and physiological parameters including chlorophyll content, leaf osmotic substances, relative electrical conductivity (REC), malondialdehyde (MDA), chlorophyll fluorescence parameters, antioxidant substance content and root conformation parameters were measured. Correlation and principal component analyses were conducted for comprehensive analysis.【Result】The results showed that the REC, MDA, leaf osmotic substances and root conformation parameters of marigold leaves exhibited an increasing trend with the prolongation of saline and alkaline stress, while the chlorophyll content and leaf fluorescence parameters showed a decreasing trend. The magnitude of the changes of each index was reduced after exogenous H_2O_2 treatment, with clear concentration-dependent responses. Among all treatments, T4(200 μmol/L) resulted in smallest decrease in chlorophyll content, leaf fluorescence parameters, and root conformation parameters, as well as the lowest increase in MDA and REC. T4 also showed the greatest enhancement in leaf osmotic regulation. After comprehensive evaluation, the rankings of the treatments were CK>T4>T3>T2>T5>T1.【Conclusion】It was shown that exogenous H_2O_2 could promote the growth of the root system of marigold, enhance the photosynthetic and osmotic regulating ability of the leaves, and activate the activity of antioxidant enzymes, which could slow down the damage of membrane lipid peroxidation. Ultimately alleviate the damage of saline and alkaline stress on marigold with the most effective concentration being 200 μmol/L.

Key words: exogenous H_2O_2; marigold; saline-alkali stress; physiological characteristics; photosynthetic characteristics

(责任编辑:刘建荣)