

引用格式:

王宁, 邵靖, 毕婷婷. 盐胁迫对入侵植物节节麦与小麦竞争关系的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 145–151.

WANG N, SHAO J, BI T T. Effect of salt stress on interspecific competition between *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(2): 145–151.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



盐胁迫对入侵植物节节麦与小麦竞争关系的影响

王宁¹, 邵靖², 毕婷婷³

(1.河南科技大学园艺与植物保护学院, 河南 洛阳 471023; 2.洛阳市隋唐城遗址植物园管理处, 河南 洛阳 471001; 3.洛阳市园林绿化中心, 河南 洛阳 471001)

摘 要:以节节麦为试材, 采用盆栽控制试验, 运用 de Wit 替代系列方法, 研究不同浓度(0、50、100、200、400 mmol/L)中性盐(NaCl)及碱性盐(Na₂CO₃)胁迫对其生长发育及与小麦竞争关系的影响。结果表明: 不同盐胁迫均能抑制节节麦和小麦的生长发育, 并造成 2 种植物的株高、叶面积及总生物量下降; 节节麦和小麦均通过提高 SOD 活性及脯氨酸含量抵御不同盐胁迫, 但随着处理浓度的增加, 2 种植物的相对电导率及硫代巴比妥酸(TBARS)含量均明显增加, 表明盐胁迫对 2 种植物细胞膜损伤程度持续加剧; 不同盐胁迫还导致了 2 种植物的叶绿素含量明显下降; 从 SOD 活性、脯氨酸含量、相对电导率及 TBARS 含量的增幅以及叶绿素含量的降幅可知, 同种盐胁迫对节节麦的损伤程度小于对小麦的, 而 Na₂CO₃ 对 2 种植物造成的伤害程度大于 NaCl; 从节节麦的竞争平衡指数(CB)可知, 不同盐胁迫条件下节节麦的竞争能力依然大于小麦, 但随处理浓度的增加呈先升后降的趋势。总之, 通过形态结构及生理特性的调整, 节节麦对不同种类盐胁迫均表现出了一定的适应性, 而这也可能是盐胁迫条件下其竞争能力依然大于小麦的重要原因。

关 键 词: 节节麦; 小麦; 盐胁迫; 总生物量; 竞争关系

中图分类号: S451; S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2023)02–0145–07

Effect of salt stress on interspecific competition between *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum*

WANG Ning¹, SHAO Jing², BI Tingting³

(1.College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2.Luoyang Botanic Garden Management Office of Sui & Tang Dynasties Relics, Luoyang, Henan 471001, China; 3.Landscaping Center of Luoyang, Luoyang, Henan 471001, China)

Abstract: Using the replacement series experiments designed by de Wit, the effects of different concentrations(0, 50, 100, 200, 400 mmol/L) of neutral salt(NaCl) and alkaline salt(Na₂CO₃) on the morphological structure, physiological characteristics and competitiveness of the invasive plant *Aegilops tauschii* were investigated. The results showed that the growth of both *A. tauschii* and wheat were inhibited by salt stress, and caused a decrease in plant height, leaf area and total biomass of the two studied plants. Both *A. tauschii* and wheat adapted to the salt stress environment through increasing SOD activity and proline content. However, as the salt stress was exacerbated, the relative conductivity and thiobarbituric acid(TBARS) content significantly increased of both the two studied plants, which indicated that the salt stress caused a continually aggravating damage to plant cell membrane. Salt stress also caused a decrease in chlorophyll content of the two studied plants. As suggested by the level of increase in SOD activity and the other five physiological indicators, *A. tauschii* was more tolerant to the salt stress, while the damage degree of Na₂CO₃ to the two studied plants were greater than those of NaCl. As shown by the CB value, *A. tauschii* was more competitive than wheat even under salt stress. All

收稿日期: 2022–09–06

修回日期: 2023–03–22

基金项目: 河南省自然科学基金项目(182300410092); 洛阳市公益性行业科研专项(2022087)

作者简介: 王宁(1979—), 男, 河南鄢陵人, 博士, 副教授, 主要从事外来植物入侵机理研究, 9903899@haust.edu.cn

together, *A. tauschii* was showed more tolerant of the salt stress than wheat through the favorable adjustment of morphology, biomass allocation pattern and physiological features, indicating *A. tauschii* was a superior variety to wheat under salt stress conditions.

Keywords: *Aegilops tauschii*; *Triticum aestivum*; salt stress; total biomass; competition

土壤盐渍化已成为全球范围内影响农业生产的环境问题^[1]。据统计,全球范围内不同程度的盐碱化土地面积已超过 10 亿 hm^2 , 约有 1/5 的耕地受到盐胁迫的影响^[2]。中国盐碱土壤约有 200 万 hm^2 , 主要分布于东北、华北、西北内陆地区以及长江以北沿海地区^[3-4]。盐胁迫条件下, Na^+ 和 Cl^- 被植物大量吸收, 诱发渗透及离子胁迫, 造成膜透性的改变及生理代谢紊乱, 抑制植物的生长发育, 甚至导致植物死亡^[5-6]。此外, 渗透胁迫和离子胁迫还会引起其他次生胁迫, 如有毒代谢产物的积累和营养物质的失衡^[7]。

节节麦(*Aegilops tauschii* Coss.)为世界十大恶性杂草之一, 具有繁殖能力强、适生范围广、易传播等特点, 与小麦的生长习性、出苗时间及苗期特征极其接近, 是小麦条锈病的替代宿主; 因此, 极易造成小麦的减产甚至绝收^[8]。至今, 有关节节麦对盐碱胁迫的适应性研究较少。房锋^[8]分析了 NaCl 胁迫对节节麦种子萌发特性的影响; 王宁等^[9]初步探讨了 NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫对节节麦种子萌发及幼苗生长的影响, 研究结果表明, 节节麦具有一定的耐盐碱能力。本研究以节节麦为试材, 探讨盐胁迫对其与小麦竞争关系的影响, 旨在为其入侵扩散的早期预警及对小麦的危害机制研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试节节麦及小麦‘新麦32’种子来源于河南省新乡农业科学院。其中, 节节麦千粒质量为 12.32 g, 种子的平均纵径、横径分别为 5.98、2.54 mm。试验于 2021 年在河南科技大学科教试验园 (34°59'N, 112°16'E) 进行。该地区属温带季风气候, 海拔高度 209 m。年均气温 14.86 °C, 年均降水量 578.2 mm。

1.2 盆栽试验

2021 年 9 月, 将经过筛选的节节麦及小麦种子播种至营养钵内, 基质含珍珠岩、蛭石、草炭(体积比为 1:1:1), 在光照培养箱内进行催芽处理(昼夜温度 25 °C/20 °C、各 12 h), 待种子破土后, 将营养钵移至室外培养。待幼苗生长至“两叶一心”时(分蘖

开始阶段^[10]), 选取高度及长势基本一致的节节麦和小麦幼苗移栽至盆内, 每盆种植 8 株。栽培基质由珍珠岩、蛭石、营养土按 1:1:3(体积比)配制而成。采用 de Wit 取代试验方法^[11], 设置节节麦与小麦单种及等比例混种 2 种植模式, 每盆种植密度相同。幼苗移栽后置于遮阳处缓苗 14 d, 期间进行补苗处理, 定期浇水。缓苗结束后, 将盆栽试验材料置于室外。

1.3 盐胁迫处理

缓苗结束后, 进行盐胁迫处理。 NaCl 、 Na_2CO_3 溶液各设 5 个浓度, 0(CK)、50、100、200、400 mmol/L, 每个处理 3 次重复。采用灌根的方式进行盐胁迫处理, CK 组浇灌蒸馏水。为了避免盐激反应, 盐浓度以每天 50 mmol/L 递增, 待处理浓度达到设定浓度后, 记为第 0 天, 30 d 后结束试验。每个处理 10 盆, 共计 300 盆。每盆垫置托盘, 为了避免盐分流失, 浇水后将溢出的溶液倒回盆内。盐胁迫处理后进行正常管理和浇水, 养护期间维持土壤水分, 以保证植物正常生长。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 形态及生物量指标的测定

单种及混种模式下, 每个处理选取 5 盆, 每盆随机选取 3 株。测量株高后, 采用扫描仪和 Photoshop 软件测定叶面积^[12]。将叶片、茎和根分别保存于纸袋中, 置于 80 °C 的烘箱中烘干至恒重, 称量干质量。

1.4.2 生理指标的测定

单种模式下, 每个处理选取 3 盆, 每盆随机选取 3 株。每个处理切取适量成熟叶(从上到下第三或第四片叶子)约 2.00 g, 参照文献[13-14]的方法, 采用 95% 乙醇法测定叶绿素含量(包括叶绿素 a、叶绿素 b); 采用硝基蓝四氮唑光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性; 采用硫代巴比妥酸法测定硫代巴比妥酸(TBARS)的含量; 采用电导法测定相对电导率; 采用酸性茚三酮法测定脯氨酸(Pro)含量。

1.5 数据处理

采用相对产量、相对产量总和及竞争平衡指数

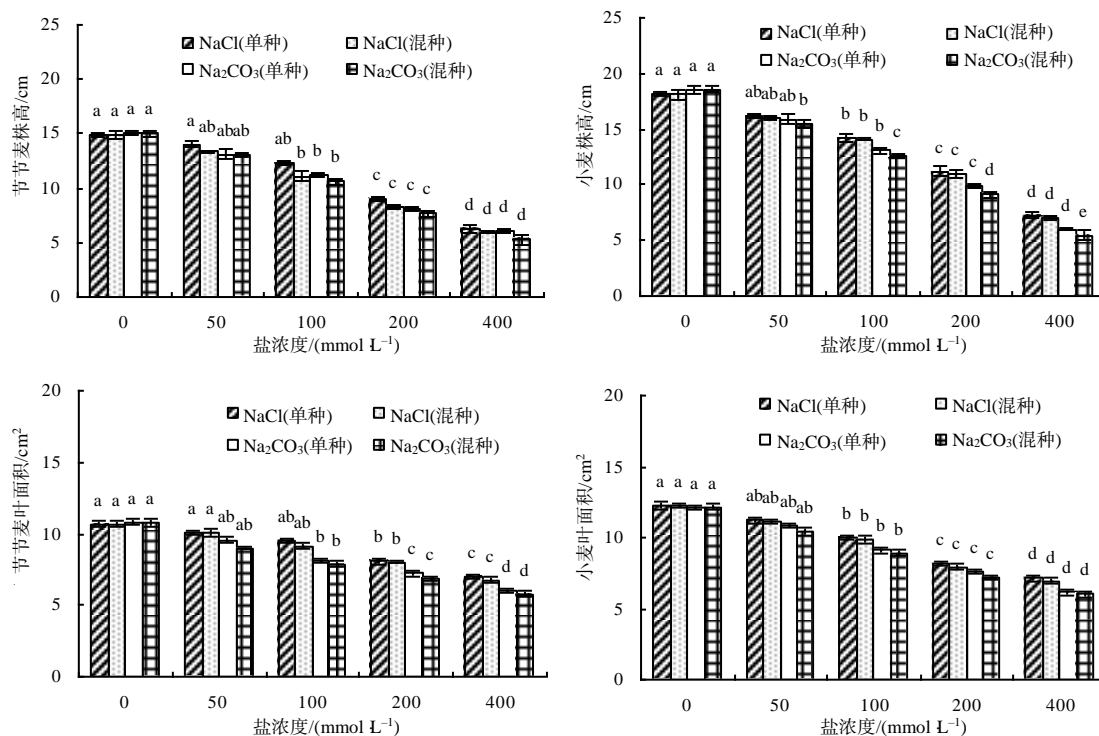
衡量节节麦与小麦间的竞争能力强弱^[11,15-16]。采用 SPSS 19.0 进行数据统计分析;采用 Excel 2010 绘图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对节节麦和小麦幼苗生长发育的影响

随着盐浓度的增加,单种及混种模式下节节麦和小麦的株高、叶面积均呈逐渐下降的趋势(图1)。400 mmol/L NaCl胁迫,单种、混种节节麦株高分别较CK的下降了57.96%、59.99%,单种、混种小麦株高分别较CK的下降了60.12%、61.47%;400

mmol/L Na_2CO_3 胁迫,单种、混种节节麦的株高较CK的下降了60.04%、65.00%,单种、混种小麦株高分别较CK的下降了67.58%、70.49%,且差异均达显著水平。400 mmol/L NaCl胁迫,单种、混种节节麦的叶面积较CK的下降了34.36%、36.86%,单种、混种小麦的叶面积较CK的下降了41.63%、43.15%;400 mmol/L Na_2CO_3 胁迫,单种、混种节节麦的叶面积较CK的下降了43.88%、46.15%,单种、混种小麦的叶面积较CK的下降了49.42%、50.66%,且差异均达显著水平。



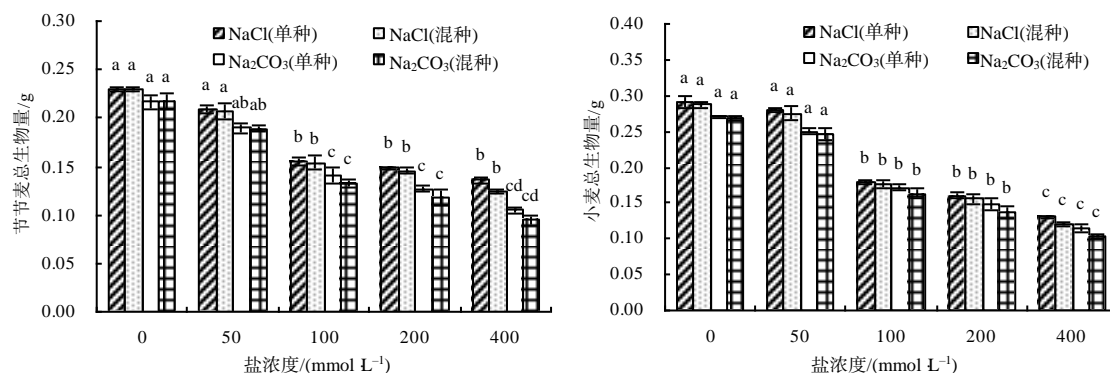
不同小写字母表示NaCl或 Na_2CO_3 胁迫下同一种植模式下的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图1 不同盐胁迫处理节节麦和小麦的株高及叶面积

Fig.1 Plant height and leaf area of *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum* with different salt stress treatments

随着盐浓度的增加,单种及混种条件下节节麦

和小麦的总生物量均呈下降的趋势(图2)。当盐浓度



不同小写字母表示NaCl或 Na_2CO_3 胁迫下同一种植模式下的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 不同盐胁迫处理节节麦和小麦的总生物量

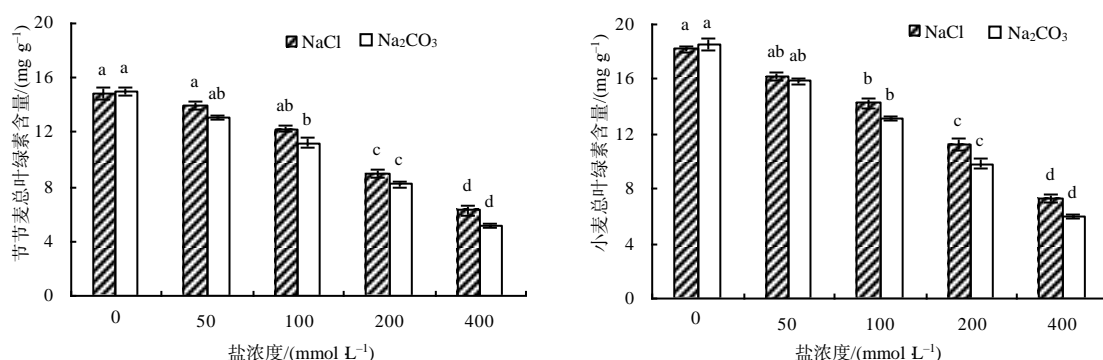
Fig.2 Total biomasses of *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum* with different salt stress treatments

达到 400 mmol/L 时, 与 CK 相比, NaCl 胁迫中单种、混种模式下节节麦总生物量下降了 40.87%、45.51%, 单种、混种模式下小麦总生物量下降了 54.83%、58.19%; Na₂CO₃ 胁迫, 单种、混种模式下节节麦总生物量下降了 51.48%、56.24%, 单种、混种模式下小麦总生物量下降了 57.78%、61.71%, 且差异均达显著水平。

2.2 盐胁迫对节节麦和小麦幼苗生理特性的影响

随着盐浓度的增加, 单种节节麦和小麦总叶绿

素含量均呈持续下降的趋势(图 3)。其中, 200 mmol/L NaCl 胁迫, 节节麦的总叶绿素含量与 CK 差异显著, 而 100 mmol/L Na₂CO₃ 胁迫时与 CK 差异显著; NaCl 和 Na₂CO₃ 胁迫中小麦的总叶绿素含量均在盐浓度为 100 mmol/L 时与 CK 差异显著。当盐浓度达到 400 mmol/L 时, NaCl 胁迫下节节麦的叶绿素含量较 CK 的下降了 64.29%, 小麦较 CK 的下降了 68.56%; Na₂CO₃ 胁迫, 节节麦的叶绿素含量较 CK 的下降了 77.63%, 而小麦的则较 CK 的下降了 81.94%。



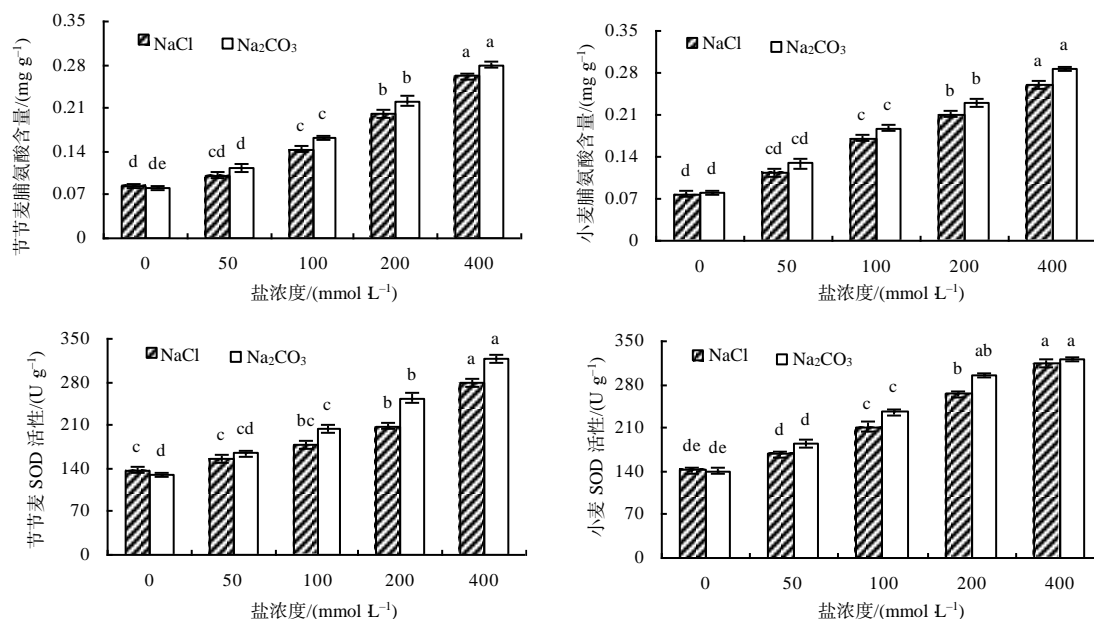
不同小写字母表示NaCl或Na₂CO₃胁迫下总叶绿素含量的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图 3 不同盐胁迫处理节节麦和小麦的总叶绿素含量

Fig.3 Total chlorophyll contents of *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum* with different salt stress treatments

随着盐浓度的增加, 单种节节麦和小麦脯氨酸含量及 SOD 活性均呈持续增加的趋势(图 4)。当盐

浓度达到 400 mmol/L 时, 与 CK 相比, NaCl 胁迫节节麦的脯氨酸含量增加了 210.71%, 小麦的增加



不同小写字母表示表示NaCl或Na₂CO₃胁迫下脯氨酸含量或SOD活性的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

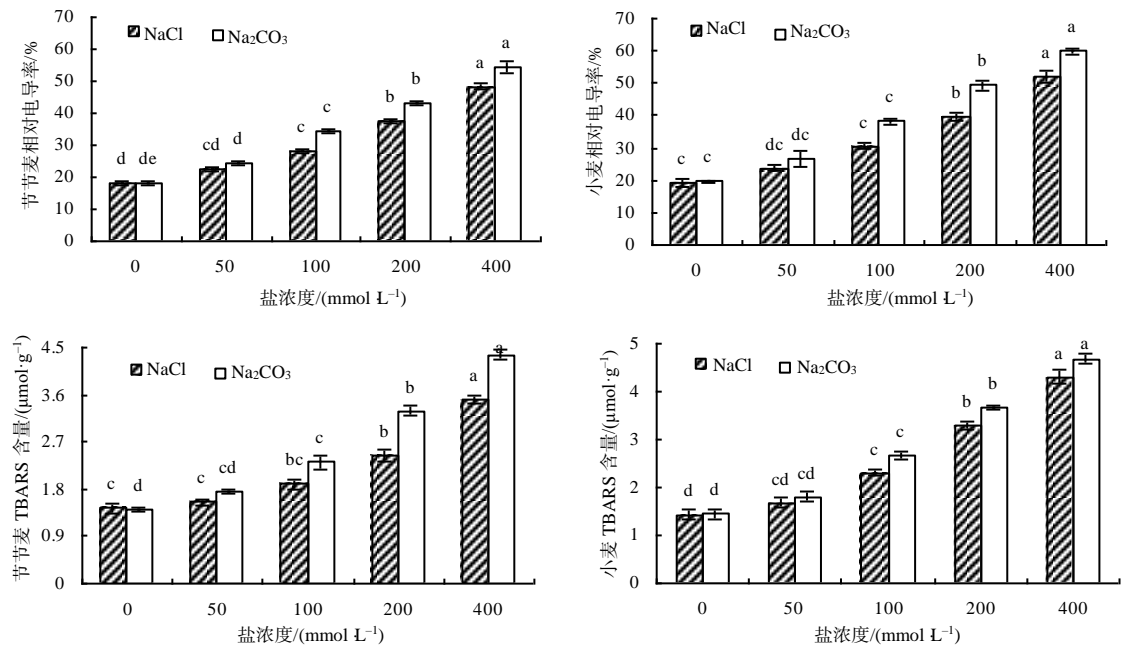
图 4 不同盐胁迫处理节节麦和小麦的脯氨酸含量及 SOD 活性

Fig.4 Proline contents and SOD activities of *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum* with different salt stress treatments

了 234.62%；Na₂CO₃胁迫节节麦的脯氨酸含量增加了 245.68%，小麦的增加了 260.00%。400 mmol/L NaCl 胁迫，节节麦的 SOD 活性较 CK 的增加了 102.38%，小麦的增加了 123.41%；400 mmol/L Na₂CO₃胁迫，节节麦的 SOD 活性较 CK 的增加了 142.16%，小麦的增加了 129.03%，且差异均达到了显著水平。此外，400、200 mmol/L 的 Na₂CO₃胁迫处理的小麦的 SOD 活性差异不显著。

随着盐浓度的增加，单种节节麦和小麦相对电导率及 TBARS 含量均呈持续增加的趋势(图 5)。与

CK 相比，当盐浓度达到 400 mmol/L 时，NaCl 胁迫节节麦的相对电导率增加了 165.84%，小麦的增加了 170.59%；Na₂CO₃胁迫节节麦的相对电导率增加了 198.41%，小麦的增加了 206.76%。当盐浓度达到 400 mmol/L 时，NaCl 胁迫节节麦的 TBARS 含量较 CK 的增加了 145.28%，小麦较 CK 的增加了 201.40%；Na₂CO₃胁迫节节麦的 TBARS 含量较 CK 的增加了 209.22%，小麦较 CK 的增加了 225.00%，且差异均达显著水平。



不同小写字母表示NaCl或Na₂CO₃胁迫下相对电导率或TBARS含量的差异有统计学意义(P<0.05)。

图 5 不同盐胁迫处理节节麦和小麦的相对电导率及 TBARS 含量

Fig.5 The relative conductivities and TBARS contents of *Aegilops tauschii* and *Triticum aestivum* with different salt stress treaments

2.3 盐胁迫对节节麦和小麦竞争关系的影响

从表1可以看出，随着盐浓度的增加，节节麦的相对产量总和呈下降趋势，且均小于1；竞争平

表 1 不同盐胁迫处理节节麦的相对产量总和及竞争平衡指数

Table 1 Total relative yields and competitive balance values of *Aegilops tauschii* with different salt stress treatments

盐浓度/ (mmol L ⁻¹)	相对产量总和		竞争平衡指数	
	NaCl	Na ₂ CO ₃	NaCl	Na ₂ CO ₃
0	0.993 5	0.993 2	0.007 8ab	0.007 9ab
50	0.986 3	0.987 0	0.008 4ab	0.009 3a
100	0.988 1	0.953 8	0.009 7a	0.007 0ab
200	0.978 7	0.927 4	0.007 6ab	0.003 7c
400	0.917 6	0.904 1	0.003 4c	0.001 4d

不同小写字母表示同列数据的差异有统计学意义(P<0.05)。

衡指数则呈先升后降的趋势，但均大于 0。此外，NaCl 和 Na₂CO₃胁迫中节节麦的竞争平衡指数峰值分别出现在 100、50 mmol/L，并分别在 400、200 mmol/L 时与 CK 差异显著。

3 结论与讨论

已有的研究^[17]表明，盐胁迫条件下植物体内一些重要的生理生化过程会遭到破坏，植株的生长发育受到抑制。本研究中，随着盐浓度的增加，节节麦和小麦的株高及叶面积均呈持续下降的趋势。当盐浓度达到 400 mmol/L 时，NaCl 胁迫单种和混种条件下节节麦的株高及叶面积的降幅均小于小麦的，并均小于 Na₂CO₃胁迫中的降幅，说明盐胁迫对小麦生长发育的抑制作用大于对节节麦的，而

Na_2CO_3 胁迫的抑制作用大于 NaCl 处理。

生物量是植物对盐碱胁迫响应的综合表现,也是耐盐碱程度的重要指标^[18]。本研究中,无论是单种还是混种,随着盐浓度的增加,节节麦和小麦的总生物量均持续减小,这表明 NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫抑制了二者的生物量积累,这与前人的研究结论一致^[19-20]。与 CK 相比,当盐浓度达到 400 mmol/L 时,同种盐胁迫中单种及混种节节麦总生物量的降幅均小于小麦的,表明盐胁迫对小麦生物量积累的抑制作用大于对节节麦的。此外, NaCl 胁迫中 2 种植物总生物量的降幅均小于 Na_2CO_3 处理,这也说明 Na_2CO_3 胁迫对 2 种植物生长的抑制作用大于 NaCl 处理。

已有的研究^[20-21]表明,钠盐胁迫致使小麦叶绿素含量下降。本研究中,随着盐浓度的增加,节节麦和小麦的叶绿素含量均呈持续下降趋势,说明叶绿素的合成受到盐胁迫的抑制。究其原因可能是盐胁迫致使色素与色素蛋白的结合能力下降,破坏了类囊体膜的超微结构,促使叶绿素降解^[22]。当盐浓度达到 400 mmol/L 时,同种盐胁迫对节节麦叶绿素合成的抑制作用小于对小麦的,而 Na_2CO_3 胁迫的抑制作用大于 NaCl 处理。

植物有多种适应机制以应对盐碱胁迫,如渗透调节、有机物积累及抗氧化酶的变化^[23]。已有的研究表明, SOD 活性的增加会提高水稻^[24]、小麦^[25]及大麦^[26]的耐盐性。本研究中,随着盐浓度的增加,节节麦和小麦均会通过脯氨酸的积累和 SOD 活性的提高来应对盐胁迫。当盐浓度达到 400 mmol/L 时, Na_2CO_3 胁迫中 2 种植物脯氨酸含量及 SOD 活性的增幅均明显大于 NaCl 处理的,表明 Na_2CO_3 胁迫对 2 种植物的危害程度大于 NaCl 处理。当 Na_2CO_3 处理浓度达到 400 mmol/L 时,与 200 mmol/L 处理相比,小麦的 SOD 活性增加不显著,这可能与小麦的耐 Na_2CO_3 胁迫的承受能力有关。

作为应对非生物胁迫细胞膜脂过氧化的重要产物, TBARS 含量被视为细胞膜受伤程度的指标^[27]。本研究中,节节麦和小麦的相对电导率均随盐胁迫浓度的增加而增加,说明 NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫对 2 种植物膜损伤程度逐渐增大。此外,随着盐胁迫浓度的增加,节节麦和小麦的 TBARS 含量均呈升高趋势,表明 NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫造成 2 种植物膜

脂过氧化程度的持续恶化。当盐浓度达到 400 mmol/L 时,同种盐胁迫条件下节节麦的相对电导率及 TBARS 含量增幅均明显小于小麦的,表明节节麦对 2 种盐胁迫的适应能力大于小麦。

生物量是植物种间竞争的重要衡量指标之一^[28]。本研究中,随着盐浓度的增加, NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫下节节麦的相对产量总和均呈逐渐减小的趋势,但始终大于 0 而小于 1,表明 2 种盐胁迫条件下节节麦和小麦之间存在竞争关系。在 NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫中,节节麦的竞争平衡指数始终大于 0,表明盐胁迫条件下节节麦的竞争优势依然大于小麦;而随着盐浓度的增加,节节麦的竞争平衡指数均呈先升后降的变化趋势,表明轻度的盐胁迫加剧了节节麦对小麦的竞争抑制作用。从盐胁迫过程中节节麦竞争平衡指数的变化可知,节节麦对小麦的竞争抑制作用随着盐浓度的持续增加总体呈逐渐减小的变化,而这也与胁迫梯度假说(SGH)理论相符。

参考文献:

- [1] RENGASAMY P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils[J]. Functional Plant Biology, 2010, 37(7): 613–620.
- [2] SHRIVASTAVA P, KUMAR R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(2): 123–131.
- [3] WANG W X, VINOCUR B, ALTMAN A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. Planta, 2003, 218(1): 1–14.
- [4] ZHAO X Y, BIAN X Y, LI Z X, et al. Genetic stability analysis of introduced *Betula pendula*, *Betula kirghisorum*, and *Betula pubescens* families in saline-alkali soil of northeastern China[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2014, 29(7): 639–649.
- [5] ISMAIL A, TAKEDA S, NICK P. Life and death under salt stress: same players, different timing?[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(12): 2963–2979.
- [6] KRONZUCKER H J, BRITTO D T. Sodium transport in plants: a critical review[J]. New Phytologist, 2011, 189(1): 54–81.
- [7] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses[J]. New Phytologist, 2018, 217(2): 523–539.
- [8] 房锋. 节节麦(*Aegilops tauschii* Coss.)生态适应性[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [9] 王宁, 袁美丽. 入侵植物节节麦种子萌发及幼苗生长对盐碱胁迫的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 167–173.

- [10] HYLES J, BLOOMFIELD M T, HUNT J R, et al. Phenology and related traits for wheat adaptation[J]. *Heredity*, 2020, 125(6): 417–430.
- [11] 柳牧青, 杨小凤, 石钰铭, 等. 模拟酸雨对入侵植物豚草与伴生种鬼针草竞争关系的影响[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(8): 932–940.
- [12] 肖强, 叶文景, 朱珠, 等. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(6): 711–714.
- [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.
- [14] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [15] FOWLER N. Competition and coexistence in a north Carolina grassland II. the effects of the experimental removal of species[J]. *Journal of Ecology*, 1981, 69(3): 843–854.
- [16] WILSON J B. Shoot competition and root competition[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1988, 25(1): 279–296.
- [17] 王弯弯, 诸葛玉平, 王慧桥, 等. 外源 NO 对盐胁迫下小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 516–524.
- [18] LI X Y, PENG X Y, DU Z X, et al. Biomass, gas exchange and chlorophyll fluorescence in wheat seedlings under salt and alkali stress[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2020, 23(4): 751–756.
- [19] LV B S, LI X W, MA H Y, et al. Differences in growth and physiology of rice in response to different saline-alkaline stress factors[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(6): 1119–1128.
- [20] ZHANG K H, TANG J R, WANG Y, et al. The tolerance to saline-alkaline stress was dependent on the roots in wheat[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2020, 26(5): 947–954.
- [21] 付乃鑫, 贺明荣, 诸葛玉平, 等. 外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗生长的缓解效应及其机理[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(3): 10–17.
- [22] PARDO J M. Biotechnology of water and salinity stress tolerance[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(2): 185–196.
- [23] KATUWAL K B, XIAO B, JESPERSEN D. Physiological responses and tolerance mechanisms of seashore paspalum and centipedegrass exposed to osmotic and iso-osmotic salt stresses[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2020, 248: 153154.
- [24] MISHRA P, BHOOMIKA K, DUBEY R S. Differential responses of antioxidative defense system to prolonged salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive *Indica* rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Protoplasma*, 2013, 250(1): 3–19.
- [25] KHALIQ A, ZIA-UL-HAQ M, ALI F, et al. Salinity tolerance in wheat cultivars is related to enhanced activities of enzymatic antioxidants and reduced lipid peroxidation[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2015, 43(8): 1248–1258.
- [26] GAO R H, DUAN K, GUO G M, et al. Comparative transcriptional profiling of two contrasting barley genotypes under salinity stress during the seedling stage[J]. *International Journal of Genomics*, 2013: 972852.
- [27] MCKAY H M, MASON W L. Physiological indicators of tolerance to cold storage in Sitka spruce and Douglas-fir seedlings[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(6): 890–901.
- [28] GIBSON D J, CONNOLLY J, HARTNETT D C, et al. Designs for greenhouse studies of interactions between plants[J]. *Journal of Ecology*, 1999, 87(1): 1–16

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正