

DOI:10.11686/cyxb2025154

http://cyxb.magtech.com.cn

马祥, 李中兴, 杨容尘, 等. 盐胁迫对不同耐盐性燕麦糖类及内源激素含量变化的影响. 草业学报, 2026, 35(3): 235—244.

MA Xiang, LI Zhong-xing, YANG Rong-chen, *et al.* The effect of salt stress on sugar and endogenous hormone content in oat varieties with contrasting salt tolerance. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(3): 235—244.

盐胁迫对不同耐盐性燕麦糖类及内源激素含量变化的影响

马祥¹, 李中兴¹, 杨容尘¹, 琚泽亮², 贾志锋², 杨培志^{1*}

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016)

摘要:土壤盐渍化通过盐胁迫影响作物生长发育, 探讨燕麦耐盐生理机制对盐渍化治理具有重要意义。以耐盐型‘青永久461’和盐敏感型‘青引2号’燕麦为材料, 通过测定盐胁迫下叶片和根系糖类物质及内源激素含量变化, 系统分析两种材料在糖代谢途径和激素调控网络中的响应特征。结果表明, 盐胁迫下两份燕麦叶片淀粉和蔗糖含量均表现为下降, 而葡萄糖和果糖增加, 且盐胁迫下敏盐材料‘青引2号’叶片中的葡萄糖和果糖含量分别是‘青永久461’的1.60和1.59倍。此外, 盐胁迫下两份燕麦叶片和根系均能够大量合成和积累脱落酸(ABA), 造成生长素(IAA)/ABA和玉米素(ZA)/ABA下降, 同时调控根系12-氧代植物二烯酸(OPDA)向上运输, 叶片OPDA含量积累并以此来促进燕麦气孔关闭来适应盐胁迫。耐盐燕麦‘青永久461’在盐胁迫下能够在体内积累更多的IAA和促进叶片SA的生物合成以抵抗盐胁迫, 敏盐燕麦‘青引2号’则通过叶片中积累较高的ZA含量并调控体内茉莉酸(JA)向茉莉酸-异亮氨酸(JA-Ile)的转化以适应盐胁迫。本研究揭示了不同耐盐性燕麦在碳分配策略和激素交互网络的异同, 为解析燕麦耐盐机制提供理论依据。

关键词:燕麦; 盐胁迫; 糖含量; 内源激素; 生理响应

The effect of salt stress on sugar and endogenous hormone content in oat varieties with contrasting salt tolerance

MA Xiang¹, LI Zhong-xing¹, YANG Rong-chen¹, JU Ze-liang², JIA Zhi-feng², YANG Pei-zhi^{1*}

1. College of Grassland and Grassland Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Animal Husbandry and Veterinary Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China

Abstract: Soil salinization affects crop growth and development through salt stress, and exploring the physiological mechanisms of oat (*Avena sativa*) salt tolerance is of great significance for managing salinization. The salt tolerant ‘Qingyongjiu 461’ and salt sensitive ‘Qingyin No. 2’ oat varieties were compared in this research, and changes in sugar substances and endogenous hormone content in leaves and roots of plants under salt stress were quantified to elucidate the response characteristics of the two materials in the sugar metabolism pathway and hormone regulation network. The results showed that under salt stress, the contents of starch and sucrose in the leaves of both oat varieties decreased, while glucose and fructose increased. Hence, under salt stress, the contents of glucose and fructose in the leaves of the salt-sensitive material ‘Qingyin No. 2’ were, respectively, 1.60 and 1.59 times those

收稿日期: 2025-04-24; 改回日期: 2025-06-25

基金项目: 青海省基础研究计划项目(2023-ZJ-750)和青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目资助。

作者简介: 马祥(1987—), 男, 青海民和人, 副研究员, 博士。E-mail: 373536152@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yangpeizhi@126.com

of ‘Qingyongjiu 461’. In addition, under salt stress, both oat varieties synthesized and accumulated abscisic acid (ABA) in their leaves and roots, which led to a decrease in the ratios of indole-3-acetic acid (IAA): ABA and zeatin (ZA): ABA. Meanwhile, salt stress regulated the upward transport of 12-oxo phytodienoic acid (OPDA) from the roots, resulting in the accumulation of OPDA in the leaves, thereby promoting stomatal closure in oats to adapt to salt stress. The salt-tolerant oat ‘Qingyongjiu 461’ was able to accumulate more IAA in its tissues and promote the biosynthesis of SA in leaves to resist salt stress under saline conditions. In contrast, the salt-sensitive oat ‘Qingyin No. 2’ responded to salt stress by accumulating higher levels of ZA in its leaves while regulating the conversion of jasmonic acid to jasmonic acid-isoleucine within the plant. This study identifies the similarities and differences in carbon allocation strategies and hormone interaction networks between two oat genotypes with contrasting salt tolerance levels, providing elucidation of the physiological basis of the salt tolerance mechanisms of oats.

Key words: oats; salt stress; sugar content; endogenous hormones; physiological response

土壤盐渍化是限制农业发展的主要因素之一^[1]。在盐渍区域,由于蒸发量大、降水量少导致土壤积盐,土壤溶液水势下降,进而造成植物细胞失水而导致植株吸水困难,影响植物生长发育过程^[2]。在我国,盐碱地的分布非常广泛,由于全球气候变暖影响和传统灌溉农业不合理使用等因素,使得盐碱地面积逐年扩大。盐碱土壤类型多样,根据土壤含盐特征,可以将其区分为盐土和碱土两类,由 NaCl 和 Na₂SO₄ 引起的胁迫为盐胁迫,由 NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 引起的胁迫为碱胁迫。目前,植物耐盐性研究已在多种植物中开展,如小麦 (*Triticum aestivum*)^[3]、棉花 (*Gossypium hirsutum*)^[4]、羊草 (*Leymus chinensis*)^[5] 和燕麦 (*Avena sativa*)^[6] 等,不同植物耐盐碱的能力差异较大,研究人员已经在植物对盐碱的适应性反应及如何提高植物的耐盐碱能力等方面取得了一定的成果^[7-8]。

研究表明,植物在盐胁迫下,为了维持细胞质的正常渗透压,会大量积累盐离子以及一些有机物质如淀粉、脯氨酸和可溶性糖等来维持渗透平衡^[9]。糖在植物中的调节机制相当复杂,不同部位的糖信号来源于不同类型的糖源,糖浓度在植物发育过程中有很大的变化,且与环境信号和生物与非生物逆境胁迫相关^[10]。可溶性糖是碳水化合物由源到库的主要运输形式,也是其他有机溶质的碳架和能量来源。研究表明,可溶性糖的积累与植物的耐盐性有关^[11-12]。张晓澎等^[13]对盐胁迫下 20 份来源不同的燕麦苗期的可溶性糖含量分析发现,多份材料在 NaCl 胁迫后植株的可溶性糖含量明显高于未处理组,但各材料的处理组间存在明显差异,通过主成分分析发现,可溶性糖含量可作为燕麦苗期耐盐评价的重要鉴定指标。另有研究表明,在 NaCl 胁迫下,燕麦体内可溶性糖含量呈先升高后降低的趋势,且耐盐燕麦的可溶性糖含量下降时间晚于敏盐品种,说明在盐胁迫初期,燕麦能够通过增加有机渗透调节物质含量来维持细胞渗透势的平衡,当胁迫时间延长,细胞渗透调节能力逐渐下降,从而影响燕麦苗期的生长^[14]。

此外,在复杂的生物系统中,可溶性糖可与多种激素及生长因子信号相互作用调节植物代谢和生长^[15]。植物激素贯穿在植物个体发育的整个阶段,常见的内源激素主要包括生长素 (auxin, IAA)、赤霉素 (gibberellin, GA)、细胞分裂素 (cytokinins, CTKs)、脱落酸 (abscisic acid, ABA)、乙烯 (ethylene, ETH)、水杨酸 (salicylic acid, SA) 和茉莉酸 (jasmonic acid, JA) 等。植物内源激素对逆境的生理响应是植物抗性研究的重点,研究发现盐胁迫影响植株体内 ABA、IAA、玉米素 (zeatin, ZA) 和 GA 等激素的平衡,改变内源激素的含量^[16-17]。对不同耐盐性水稻 (*Oryza sativa*) 在盐胁迫下的激素响应研究发现,ABA 含量在盐胁迫处理初期迅速增加,随着胁迫时间的延长而逐渐降低;JA 与 ABA 含量正好相反,其中盐敏感品种中 JA 含量明显高于耐盐品种;而 SA 含量的变化与品种耐盐性没有明显相关性^[18]。高彩婷等^[19]利用转录组测序技术对燕麦响应盐胁迫的差异基因和代谢通路进行了分析,结果发现多条植物激素信号转导途径、渗透调节途径参与了燕麦对盐胁迫的响应,但有关盐胁迫下燕麦激素含量变化的研究尚未见报道。植物面临不利的环境条件时,可通过调节植物内源激素含量及比值、调节基因表达和改变生理状态来应对外部环境变化,从而提高其在不利条件下的生存能力。尽管植物内源激素含量较低,但激素之间通过相互协调共同调控植物的生长发育及胁迫后的生理生化反应。

燕麦作为粮饲兼用型作物,具有耐盐碱、耐贫瘠和抗寒等特性,不仅具有丰富的营养价值,且与小麦、水稻等传统栽培作物相比,具有更强的抗逆性,且对盐碱土表现出良好的适应性。因此,燕麦已成为改良盐碱地的优势作物,在许多国家备受重视并广泛栽培。基于此,为探究盐胁迫对不同耐盐性燕麦糖类和内源激素含量的影响,本研究以前期课题组筛选获得的耐盐材料‘青永久 461’和敏盐材料‘青引 2 号’为材料,使用 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 人工模拟盐胁迫,通过系统测定不同耐盐性燕麦叶片和根系中糖、淀粉及内源激素含量的变化,探讨两种耐盐性不同的燕麦材料在响应盐胁迫下生理和激素代谢差异,以期燕麦抗盐育种提供更有效的科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

耐盐材料‘青永久 461’和敏盐材料‘青引 2 号’由青海大学畜牧兽医科学院保存并提供。

1.2 试验设计

试验于 2024 年 12 月于青海大学畜牧兽医科学院步入式人工气候室(布朗特 BRX-5000FL-LED, 宁波)进行,温室温度保持在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}/20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (白天/夜晚),相对湿度为 50%,挑选‘青永久 461’和‘青引 2 号’的种子种于铺有滤纸的方形发芽盒(长 $12 \text{ cm} \times$ 宽 $12 \text{ cm} \times$ 高 3 cm)内,每盒 50 粒,每份材料分别种 3 盒,生长 7 d 后,选取长势一致的燕麦植株移栽至水培塑料盆(直径 $22 \text{ cm} \times$ 高 18 cm)中,每盆定苗 15 株。生长初期浇灌 $1/2$ Hoagland 营养液,每 3 d 更换营养液,幼苗长到三叶一心期进行盐胁迫处理。对照组(CK)继续浇灌 $1/2$ Hoagland 营养液,盐处理组(T)浇灌溶有 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 的 $1/2$ Hoagland 营养液,连续处理 7 d 时采集叶片和根系,液氮速冻后放入 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱保存用于生理指标测定,每个处理设置 3 个生物学重复。

利用蒽酮比色法测定蔗糖、果糖、葡萄糖和淀粉含量^[20]。各试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司,货号分别是 BC2465、BC2455、BC2505、BC0700,具体步骤按照说明书进行。

利用高效液相色谱法(HPLC)测定植物内源激素含量^[21]。试验利用岛津超高效液相色谱仪 LC-20A 与三重四极杆质谱仪 LCMS-8040 联用系统进行测定,分析仪器为 LC-20A 系统(东京,日本),色谱柱为 Shim-pack XR-ODS III $2.0 \text{ mm I. D.} \times 75 \text{ mm}$, $1.6 \text{ }\mu\text{m}$,流动相为 A— $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲酸铵(含 0.05% 甲酸),B—甲醇。流速是 $0.3 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样体积为 $5 \text{ }\mu\text{L}$,柱温: $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分别称取各材料叶片和根系鲜样 0.2 g ,测定生长素(IAA)、脱落酸(ABA)、水杨酸(SA)、茉莉酸(JA)、茉莉酸-异亮氨酸(jasmonic acid-isoleucine, JA-Ile)、12-氧代植物二烯酸(OPDA)和玉米素(ZA)含量,每个处理设置 3 个生物学重复。

1.3 数据统计与分析

使用 SPSS 22.0 软件进行数据统计和方差分析,对数据执行单因素方差分析($P < 0.05$)和 Duncans 检验法进行多重比较,同一材料对照组和处理组采用 *T* 检验分析,采用 GraphPad Prism 9 作图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对不同耐盐燕麦材料淀粉和可溶性糖含量的影响

正常处理条件下,敏盐材料‘青引 2 号’叶片淀粉含量显著高于‘青永久 461’($P < 0.05$),而根系淀粉含量基本一致($P > 0.05$),盐胁迫显著降低了‘青永久 461’叶片淀粉含量($P < 0.05$),而‘青引 2 号’叶片淀粉含量有所降低但差异不显著($P > 0.05$),两份材料的根系淀粉含量均显著积累,且盐胁迫下耐盐材料‘青永久 461’的根系淀粉含量显著高于‘青引 2 号’($P < 0.05$)。正常处理条件下,耐盐材料‘青永久 461’叶片蔗糖含量显著高于‘青引 2 号’($P < 0.05$),胁迫处理后,两份材料叶片蔗糖含量均较其对照显著降低($P < 0.05$),但‘青永久 461’叶片蔗糖含量仍显著高于‘青引 2 号’($P < 0.05$),根系蔗糖含量在盐胁迫下均表现为降低,但‘青引 2 号’显著高于‘青永久 461’($P < 0.05$)。此外,盐胁迫极显著增加了叶片和根系的葡萄糖和果糖含量($P < 0.01$),且胁迫下敏盐材料‘青引 2 号’叶片中的葡萄糖和果糖含量分别是‘青永久 461’的 1.60 和 1.59 倍(图 1)。

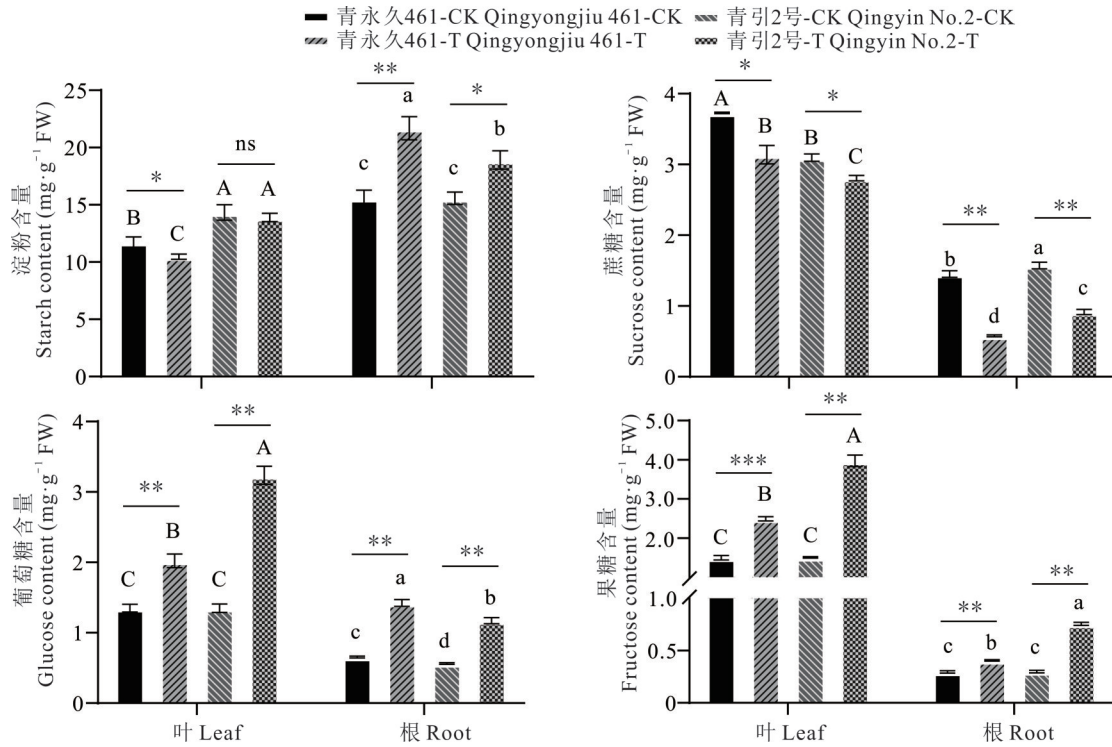


图1 盐胁迫对‘青永久461’和‘青引2号’淀粉和可溶性糖含量的影响

Fig. 1 Effects of salt stress on starch and soluble sugar content in ‘Qingyongjiu 461’ and ‘Qingyin No. 2’

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: $P > 0.05$. 不同大写字母和小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different uppercase and lowercase letters show significant difference at $P < 0.05$ among groups. The same below.

2.2 盐胁迫对不同耐盐燕麦材料内源激素含量的影响

2.2.1 IAA、ZA、SA和ABA含量的变化

正常处理条件下,耐盐材料‘青永久461’叶片IAA显著高于敏盐材料‘青引2号’($P < 0.05$),盐胁迫极显著增加了‘青永久461’叶片中的IAA含量($P < 0.01$),而‘青引2号’IAA含量增加不显著($P > 0.05$,图2)。根系IAA含量在盐胁迫下的表现明显不同,‘青永久461’表现为IAA含量相比对照显著增加($P < 0.05$),而‘青引2号’IAA含量呈极显著下降的变化趋势($P < 0.01$)。

ZA含量测定发现,正常处理下,‘青永久461’叶片ZA含量显著高于‘青引2号’($P < 0.05$),二者根系ZA含量差异不显著($P > 0.05$),盐胁迫下,‘青永久461’叶片中的ZA含量变化不显著($P > 0.05$),根系ZA含量则相比对照极显著增加($P < 0.01$),而‘青引2号’则表现为叶片ZA含量相比对照显著增加($P < 0.05$),是对照处理的3.21倍,根系ZA含量无显著变化($P > 0.05$,图2)。

正常处理下,‘青永久461’叶片SA含量显著高于‘青引2号’,而根系SA含量显著低于‘青引2号’($P < 0.05$),盐胁迫处理后,耐盐燕麦‘青永久461’和敏盐材料‘青引2号’叶片SA含量急剧上升,与其对照相比差异均显著($P < 0.05$),且盐胁迫下‘青永久461’叶片SA含量是‘青引2号’的3.36倍(图2)。根系SA含量测定发现,‘青永久461’根系SA含量在盐胁迫下相比其对照极显著下降($P < 0.01$),而‘青引2号’仍极显著增加($P < 0.001$)。

正常处理下,两份材料叶片和根系ABA含量差异均不显著($P > 0.05$),盐胁迫下,两份燕麦材料叶片和根系中的ABA含量相比对照均显著增加(图2),耐盐燕麦‘青永久461’叶片和根系中的ABA含量较其对照分别增加16.98和7.95倍,差异显著($P < 0.05$),敏盐材料‘青引2号’叶片和根系中的ABA含量较其对照分别增加4.30和3.27倍,差异极显著($P < 0.01$),且盐胁迫下‘青永久461’叶片和根系的ABA含量均显著高于‘青引2号’($P < 0.05$)。

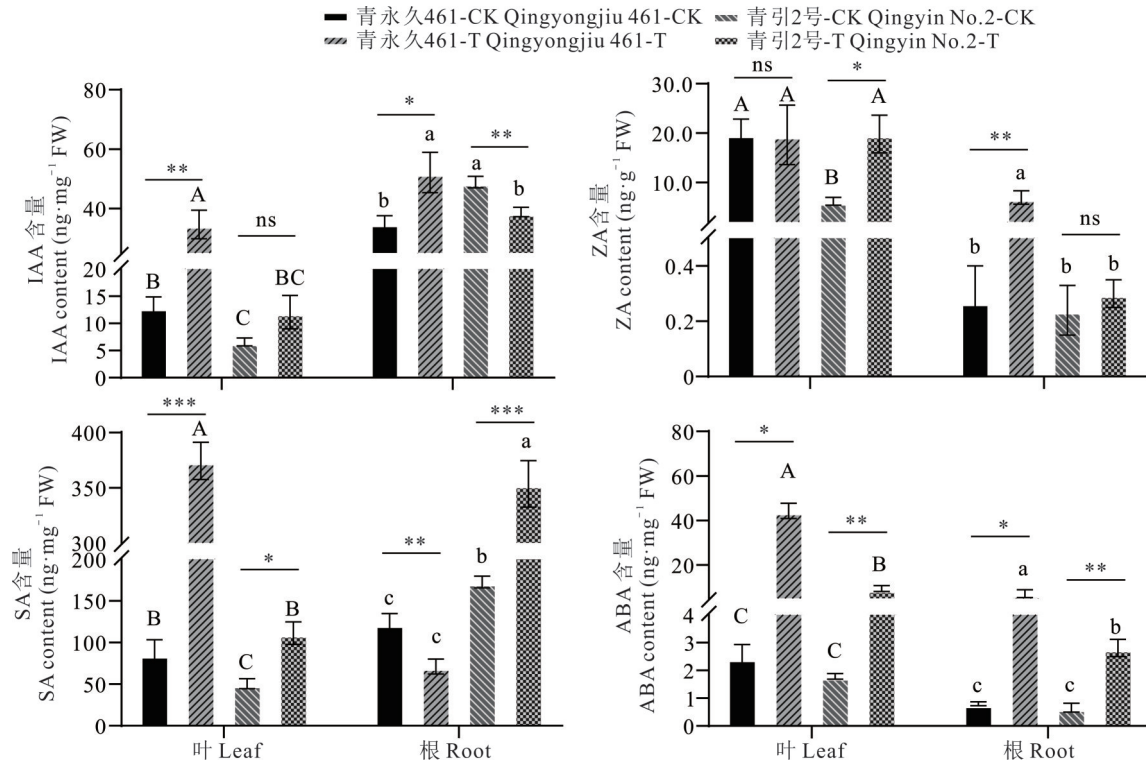


图2 盐胁迫对不同耐盐燕麦材料IAA、ZA、SA和ABA含量的影响

Fig. 2 Effects of salt stress on the contents of IAA, ZA, SA and ABA in 'Qingyongjiu 461' and 'Qingyin No. 2'

2.2.2 JA、JA-Ile和OPDA含量的变化 对正常和盐处理条件下两份燕麦叶片和根系中的JA、JA-Ile和OPDA含量测定结果如图3所示。耐盐燕麦‘青永久461’叶片JA含量在盐胁迫下表现为极显著下降($P < 0.01$),而敏盐材料‘青引2号’叶片JA含量较其对照显著增加($P < 0.05$)。根系JA含量相比其对照均呈极显著下降的趋势($P < 0.001$),‘青永久461’和‘青引2号’分别降低94.07%和25.82%。‘青永久461’和‘青引2号’叶片中的JA-Ile含量相比其对照均表现为显著下降($P < 0.05$),‘青永久461’根系JA-Ile相比对照急剧下降95.80%,差异极显著($P < 0.001$),而敏盐材料‘青引2号’根系中的JA-Ile含量较对照呈显著上升的变化趋势($P < 0.05$)。两份材料在盐胁迫下叶片和根系中的OPDA含量变化完全一致,均表现为叶片中含量显著增加而根系中含量显著下降,相比其对照差异均显著($P < 0.05$)。其中,‘青永久461’和‘青引2号’叶片OPDA含量相比其对照分别增加5.75和1.83倍,根系相比其对照分别降低47.39%和76.58%。

2.3 盐胁迫对不同耐盐燕麦材料ZA/IAA、ZA/ABA和IAA/ABA的影响

对正常和盐处理条件下两份燕麦叶片和根系中的ZA/IAA、ZA/ABA和IAA/ABA分析结果如图4所示。正常条件下,耐盐燕麦‘青永久461’叶片ZA/IAA显著高于‘青引2号’,盐胁迫后,‘青永久461’叶片中的ZA/IAA较其对照极显著下降($P < 0.01$),‘青引2号’叶片中的ZA/IAA较对照极显著增加($P < 0.01$),根系ZA/IAA变化不显著($P > 0.05$)。

两份耐盐性不同的燕麦在盐胁迫下叶片ZA/ABA相比对照均表现为下降趋势,耐盐燕麦‘青永久461’叶片ZA/ABA较对照降低94.96%,敏盐燕麦‘青引2号’叶片ZA/ABA较对照降低39.47%,差异均显著($P < 0.05$)。而盐胁迫下‘青永久461’根系ZA/ABA与对照相比呈上升的变化趋势,且差异显著($P < 0.05$),敏盐燕麦‘青引2号’根系ZA/ABA相比对照显著降低($P < 0.05$)。

耐盐燕麦‘青永久461’和敏盐材料‘青引2号’叶片和根系中的IAA/ABA在盐胁迫下的变化趋势基本一致,相比其对照均表现为下降趋势,其中,‘青永久461’叶片和根系IAA/ABA较对照下降86.14%($P < 0.05$)和82.94%($P < 0.001$),‘青引2号’叶片和根系IAA/ABA较对照下降65.64%($P < 0.01$)和82.14%($P < 0.05$)。

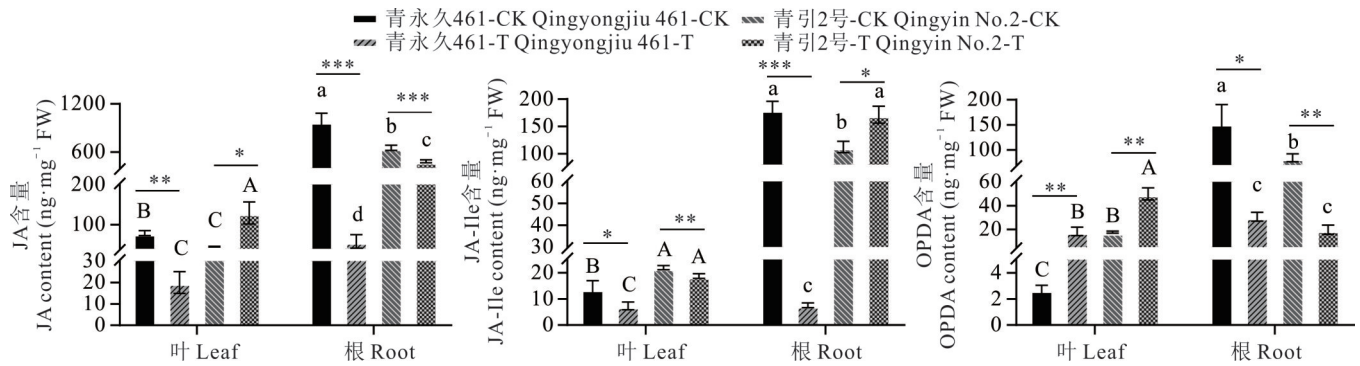


图3 盐胁迫对不同耐盐燕麦材料JA、JA-Ile和OPDA含量的影响

Fig. 3 Effects of salt stress on the contents of JA, JA-Ile and OPDA in 'Qingyongjiu 461' and 'Qingyin No. 2'

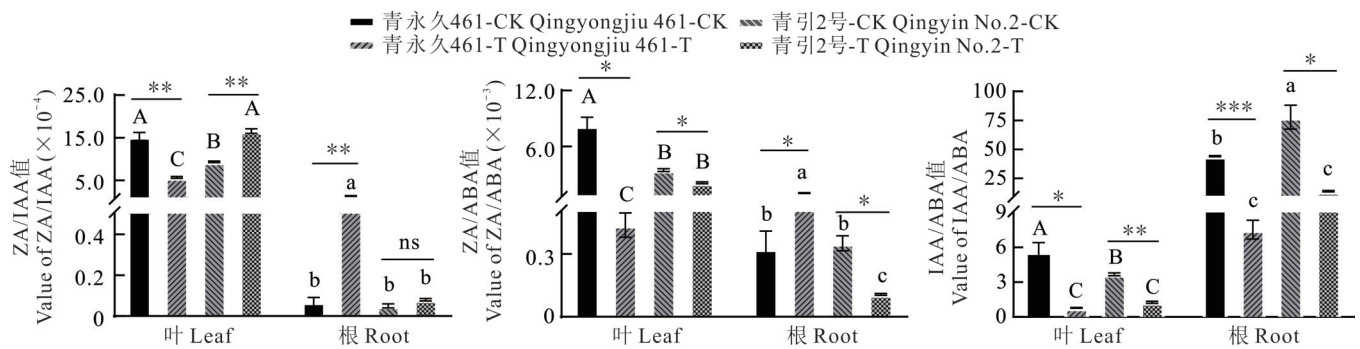


图4 盐胁迫对不同耐盐燕麦材料ZA/IAA、ZA/ABA和IAA/ABA的影响

Fig. 4 Effects of salt stress on ZA/IAA, ZA/ABA and IAA/ABA in 'Qingyongjiu 461' and 'Qingyin No. 2'

3 讨论

3.1 不同耐盐性燕麦可溶性糖含量对盐胁迫的响应

植物在盐胁迫下积累的有机物质如淀粉、脯氨酸和可溶性糖等可维持渗透平衡,这有利于植物根系在高盐的外界环境中保持水分的正常吸收^[22]。淀粉是植物体内最主要的渗透调节物质之一,能够在体内大量积累并稳定存在。在盐胁迫下,植物会分解一部分淀粉形成可溶性糖,以增大细胞的渗透压,维持水分平衡,与植物的抗逆性能密切相关。韩超等^[23]对NaCl和Na₂SO₄盐胁迫处理下梭梭(*Haloxylon ammodendron*)幼苗的淀粉含量分析发现,两种盐胁迫下梭梭幼苗同化枝中淀粉含量变化趋势相似,随着盐浓度的增加和胁迫时间的延长淀粉含量显著下降,说明梭梭幼苗接收到盐胁迫信号后通过降解淀粉生成可溶性糖来减轻盐伤害。本研究对不同耐盐性燕麦叶片和根系中的淀粉含量分析发现,两份材料叶片中的淀粉含量相对对照均有所下降,表明燕麦可通过降解叶片中的淀粉含量形成可溶性糖以适应盐胁迫,这与梭梭幼苗的研究结果一致。此外,可溶性糖也是一种重要的渗透调节物质,对于维持盐胁迫下细胞质中参与反应的多种酶活性非常必要,同时积极参与了液泡和原生质之间的渗透调节。有研究表明,盐胁迫可促进燕麦分蘖期、拔节期和孕穗期不同部位可溶性糖含量的积累,这表明燕麦可通过增加可溶性糖含量来适应盐胁迫环境^[24]。Pattanagul等^[25]对不同耐盐性水稻的可溶性糖含量分析发现,盐敏感水稻品种较抗性品种具有较高的可溶性糖含量,在盐胁迫下,可溶性糖参与渗透调节的同时还会参与作物生长,用于作物生长的可溶性糖参与渗透调节就会一定程度限制作物生长,因此该研究发现在盐敏感材料叶片中的可溶性糖含量较高,可能是以限制生长为代价的。本研究在盐胁迫处理下对不同耐盐性燕麦叶片和根系中的可溶性糖(蔗糖、葡萄糖和果糖)含量分析发现,两份材料叶片和根系蔗糖含量均明显降低,而葡萄糖和果糖含量则表现为上升,这表明盐胁迫下燕麦会分解蔗糖含量形成更多的葡萄糖和果糖以提高细胞内的溶质浓度,增强植物细胞渗透能力,进而适应盐胁迫,这与海霞^[24]的研究结果基本一致。另外,研究发现,敏盐燕麦‘青引2号’叶片相比耐盐燕麦‘青永久461’积累了更多的葡萄糖和果糖,这与前人的结果也相吻合^[26],表明‘青引2号’也可能通过

限制生长为代价积累更多的糖以适应逆境胁迫。

3.2 不同耐盐性燕麦内源激素对盐胁迫的响应

植物激素最初被定义为一组天然存在的有机物质,除了在植物的生长、发育、营养分配方面的基本功能之外,还在植物生长发育及抵抗非生物胁迫的影响中发挥重要作用^[27]。一般认为,植物内源激素 GA、IAA 和 ZA 为生长促进型激素,多数研究认为盐胁迫诱导生长促进型激素减少^[28],但也有相反的报道^[29]。研究表明,植物通过提高茎尖 IAA 合成和促进 IAA 的极性运输来调控拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)在高盐浓度下的侧根生长发育,以应对高盐胁迫环境^[30]。本研究对正常条件和盐处理条件下两份燕麦叶片和根系中的 IAA 含量测定发现,耐盐材料‘青永久 461’叶片和根系中的 IAA 含量相比对照均显著增加,叶片中 IAA 含量较根中增加的更多,而敏盐材料‘青引 2 号’叶片 IAA 含量没有显著变化,根系中的 IAA 含量显著下降,这表明盐胁迫下耐盐燕麦‘青永久 461’可通过积累体内 IAA 含量,以此在盐胁迫过程中发挥积极作用,海霞^[24]对燕麦盐胁迫下 IAA 含量测定发现,盐胁迫促进了 IAA 的积累,本研究与其结果相似。ZA 是植物体内存在的一种天然细胞分裂素(CTKs),能够促进植物细胞的分裂和扩展,从而增加植物的生物量,帮助植物在盐胁迫环境下更好地生长^[27]。本研究发现,耐盐燕麦‘青永久 461’叶片中的 ZA 含量较对照下降,而敏盐材料‘青引 2 号’较对照增加,两份材料根系中的 ZA 含量较对照均增加,这与长叶红砂(*Reaumuria trigyna*)的研究结果相似^[31],表明盐胁迫抑制了耐盐植物‘青永久 461’叶片中细胞分裂素的合成,促进了根系中细胞分裂素的积累。但对杨树(*Populus*)^[32]和向日葵(*Helianthus annuus*)^[33]的研究发现,盐胁迫下玉米素核苷(trans-Zeatin-riboside, ZR)含量随着盐胁迫处理时间的延长整体呈降低的变化趋势,本研究与此不同,这也进一步说明不同植物对逆境反应的激素响应调控机制可能存在差异。

除此之外,研究表明盐胁迫下,植株中的 ABA 浓度会显著上升,这可能是由于胁迫导致 ABA 在根的合成和向叶的运输增加,通过加速 ABA 合成和向叶片的运输来促进气孔关闭,并迅速改变离子流入护卫细胞,减少水分的蒸腾^[34]。肖强等^[35]研究发现,ABA 可显著促进盐胁迫下甘薯(*Ipomoea batatas*)幼苗生根,维持细胞膜稳定性和离子平衡,提高甘薯耐盐性。本研究发现耐盐材料和敏盐材料在盐胁迫下叶片和根系中的 ABA 含量相比对照均显著增加,敏盐材料叶片的 ABA 含量较耐盐燕麦增加更多,表明盐胁迫可促进燕麦 ABA 的合成,进而影响燕麦的盐胁迫过程。SA 在盐胁迫条件下可通过诱导抗氧化防御系统或增强抗氧化能力,缓解膜脂过氧化伤害,并通过降低质膜通透性改善细胞的代谢,调控离子吸收与分布,缓解盐胁迫的压力^[36]。沈泓等^[18]对盐胁迫下不同水稻品种的 SA 含量进行分析发现,不同品种 SA 的含量都有所增加,只是出现上升的时间点不同,其中耐盐材料的 SA 含量在盐胁迫前达到最高,表明高含量的 SA 可能与该物种的特殊耐盐性有着一定的关系。在本研究中,正常条件下,耐盐燕麦‘青永久 461’的叶片 SA 高于敏盐燕麦‘青引 2 号’,同时,盐胁迫下,‘青永久 461’根系 SA 含量在盐胁迫下明显下降,而叶片 SA 含量急剧上升,表明盐胁迫可能通过抑制‘青永久 461’根系 SA 的积累,进而促进其叶片 SA 的生物合成以抵抗盐胁迫,敏盐燕麦‘青引 2 号’根系 SA 含量表现与‘青永久 461’不同,这可能是造成两者耐盐性不同的原因之一。

JA 及其衍生物是植物响应非生物胁迫的重要信号分子,已证明可通过调节多种机制来参与植物对盐胁迫的响应。本研究测定了两种耐盐性不同的燕麦茉莉酸代谢途径的 3 种激素类物质 JA、OPDA 和 JA-Ile 的含量,结果表明,盐胁迫下耐盐燕麦‘青永久 461’叶片和根系 JA 和 JA-Ile 含量相比对照出现急剧降低,表明盐胁迫显著抑制了‘青永久 461’体内的 JA 合成,这与水稻^[18]、金银花(*Lonicera japonica*)^[37]等植物的研究结果一致,但敏盐燕麦‘青引 2 号’在盐胁迫下叶片 JA 含量上升而根系含量下降,而 JA-Ile 含量则表现为在叶片降低根系上升,表明其受到盐胁迫后能够通过调控体内 JA 向 JA-Ile 的转化以适应盐胁迫。此外,对拟南芥的研究发现,OPDA 的积累与气孔开度减小和抗旱能力的增强具有相关性^[38],植物在干旱胁迫下,能够通过阻止 OPDA 向 JA 的转化进而积累大量的 OPDA,从而促进气孔关闭以减少水分流失^[39]。本研究结果发现,两份材料 OPDA 含量均表现为叶片增加而根系降低的趋势,表明其均可能通过调控根系 OPDA 向上运输并以此来促进燕麦气孔关闭来适应盐胁迫。

此外,植物的生长发育及胁迫后的生理生化反应不仅受单个激素的动态调控,更是通过相互协调共同调控的。IAA、ZA 与 ABA 是发挥拮抗作用的激素,IAA/ABA、ZA/ABA 变化不仅影响着植物器官的生长与脱落,还

影响植物对非生物胁迫的调控。李海洋等^[33]对盐胁迫下向日葵的 IAA/ABA 分析发现,在向日葵叶片和根系中 IAA/ABA 呈下降的趋势,李青云^[40]对盐胁迫下草莓(*Fragaria*×*ananassa*)根系和叶片的 ZT/ABA(即 ZA/ABA)分析发现,盐胁迫降低了草莓根系和叶片的 ZT/ABA,并且随着盐胁迫时间的延长 ZT/ABA 均呈下降趋势,本研究结果与其相似。本研究发现胁迫下耐盐和敏盐材料在叶片和根系 IAA/ABA 均呈下降的变化趋势,表明不同耐盐性燕麦叶片和根系对盐胁迫表现出一致的抵抗和耐受。此外,耐盐‘青永久 461’叶片和敏盐‘青引 2 号’叶片和根系 ZA/ABA 也呈降低趋势,这与前人的研究结果一致。ZA/IAA 在两份燕麦材料中表现出明显的差异,其中耐盐燕麦‘青永久 461’叶片中的 ZA/IAA 较对照极显著下降,而敏盐材料‘青引 2 号’则极显著增加,这与其盐胁迫下‘青永久 461’叶片中积累较多的 IAA 而‘青引 2 号’积累较多的 ZA 有关。盐胁迫处理后两份燕麦叶片中细胞分裂素和生长素的含量及比值的差异可能影响了其耐盐性。

4 结论

不同耐盐燕麦在盐胁迫下糖代谢表现相似:叶片淀粉和蔗糖含量降低,葡萄糖和果糖增加。敏盐燕麦叶片积累的葡萄糖和果糖更多。不同激素信号途径之间复杂的信号网络和错综纷呈的交叉对话实现了燕麦对盐胁迫反应的精细调控,盐胁迫下,两份燕麦叶片和根系均能够大量合成和积累 ABA,造成 IAA/ABA 和 ZA/ABA 下降,同时调控根系 OPDA 向上运输,耐盐燕麦‘青永久 461’在盐胁迫下能够在体内积累更多的 IAA 和促进叶片 SA 的生物合成以抵抗盐胁迫,敏盐燕麦‘青引 2 号’则通过在叶片中积累较高的 ZA 含量并调控体内 JA 向 JA-Ile 的转化以适应盐胁迫。

参考文献 References:

- [1] Zhu Y, Gong H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34: 455–472.
- [2] Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, *et al.* Review on sustainable utilization of salt-affected land. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 673–684.
王佳丽, 黄贤金, 钟大洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述. *地理学报*, 2011, 66(5): 673–684.
- [3] Li S H, Xu X, Hui H X, *et al.* Study on K⁺、Na⁺ selective absorption of different organs of spring wheat under soil saline sodic stress in different growth season. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002(3): 587–594.
李树华, 许兴, 惠红霞, 等. 土壤盐碱胁迫对春小麦 K⁺、Na⁺ 选择性吸收的影响. *西北植物学报*, 2002(3): 587–594.
- [4] Xie D Y, Wang H P, Wang F X, *et al.* Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of cotton. *China Cotton*, 2000, 27(9): 12–13.
谢得意, 王惠萍, 王付欣, 等. 盐胁迫对棉花种子萌发及幼苗生长的影响. *中国棉花*, 2000, 27(9): 12–13.
- [5] Yin L J, Zhu L. Physiological responses and adaptive faculty for *Leymus chinensis* seedlings to saline alkali stress. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 1989(4): 87–95.
殷立娟, 祝玲. 羊草苗对盐碱胁迫的反应和适应性. *东北师大学报(自然科学版)*, 1989(4): 87–95.
- [6] Sun R G. Effects of salt on the physiological and biochemical characteristics of oat for late growth period and germination. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010.
孙仁国. 盐胁迫对燕麦萌发及生长后期生理生化特性的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [7] Paz R C, Rocco R A, Reinoso H, *et al.* Comparative study of alkaline, saline, and mixed saline-alkaline stresses with regard to their effects on growth, nutrient accumulation, and root morphology of *Lotus tenuis*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2012, 31: 448–459.
- [8] Wu Z H, Yang C W, Yang M Y. Photosynthesis, photosystem II efficiency, amino acid metabolism and ion distribution in rice (*Oryza sativa* L.) in response to alkaline stress. *Photosynthetica*, 2014, 52(1): 157–160.
- [9] Lobo A K M, Marcio D O M, Lima Neto M C, *et al.* Exogenous sucrose supply changes sugar metabolism and reduces photosynthesis of sugarcane through the down-regulation of rubisco abundance and activity. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 179: 113–121.
- [10] Blasing O E, Gibon Y, Gunther M, *et al.* Sugars and circadian regulation make major contributions to the global regulation of diurnal gene expression in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 2005, 17(12): 3257–3281.

- [11] Sheng M, Tang M, Zhang F, *et al.* Influence of arbuscular mycorrhiza on organic solutes in maize leaves under salt stress. *Mycorrhiza*, 2011, 21: 423–430.
- [12] Hajlaoui H, El Ayeb N, Garrec J P, *et al.* Differential effects of salt stress on osmotic adjustment and solutes allocation on the basis of root and leaf tissue senescence of two silage maize (*Zea mays* L.) varieties. *Industrial Crops and Products*, 2010, 31(1): 122–130.
- [13] Zhang X P, Deng Y T, Yang R, *et al.* Evaluation of salt tolerance of forage oat germplasm resources at germination and seedling stages. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 11(1): 11–19.
张晓澎, 邓焱天, 杨蕊, 等. 饲用燕麦种质资源萌发期及苗期耐盐性鉴定评价. *草地学报*, 2019, 11(1): 11–19.
- [14] Wang M M, Zhao G Q, Liang G L, *et al.* Physiological response of different salt-tolerant oats to salt stress. *Pratacultural Science*, 2021, 38(11): 2200–2209.
王苗苗, 赵桂琴, 梁国玲, 等. 不同耐盐性燕麦对盐胁迫的生理响应. *草业科学*, 2021, 38(11): 2200–2209.
- [15] Sun Y M, Liu L J, Feng M F, *et al.* Research progress of sugar metabolism of plants under cold stress. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(7): 95–102, 108.
孙永梅, 刘丽杰, 冯明芳, 等. 植物在低温胁迫下的糖代谢研究进展. *东北农业大学学报*, 2015, 46(7): 95–102, 108.
- [16] Li B, Sang T, He L, *et al.* Exogenous spermidine inhibits ethylene production in leaves of cucumber seedlings under NaCl stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2013, 138(2): 108–113.
- [17] Javid M G, Sorooshzadeh A, Moradi F, *et al.* The role of phytohormones in alleviating salt stress in crop plants. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(6): 726–734.
- [18] Shen H, Zhang Y, Zhang X, *et al.* Change characteristics of phytohormones contents in rice seedlings under salt stress. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(12): 30–35.
沈泓, 张樱, 张轩, 等. 盐胁迫下不同水稻品种苗期植物内源激素含量的变化特征. *湖南农业科学*, 2021(12): 30–35.
- [19] Gao C T, Liu J H, Xu S J, *et al.* Exploring the relationship of differentially expressed genes and physiological of oats in response to salt stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(7): 1385–1393.
高彩婷, 刘景辉, 徐寿军, 等. 燕麦盐胁迫响应基因的差异表达与生理响应的关系. *西北植物学报*, 2015, 35(7): 1385–1393.
- [20] Li C Y, Zhang R R, Zhu H Y, *et al.* Effects of salt stress on physiological characteristics of alfalfa seedlings and evaluation of salt tolerance at seedling stage. *Acta Agrestia sinica*, 2025, 33(2): 516–523.
李春燕, 张然然, 祝海燕, 等. 盐胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响及苗期抗盐性评价. *草地学报*, 2025, 33(2): 516–523.
- [21] Cai Y F, Shi Z M, Fu X W, *et al.* Flower bud differentiation and endogenous hormone changes of *Camellia* ‘High Fragrance’. *Molecular Plant Breeding*, (2024-07-22) [2025-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20240719.1241.008.html>.
蔡艳飞, 施自明, 付学维, 等. 山茶花‘烈香’花芽分化进程及内源激素变化. *分子植物育种*, (2024-07-22) [2025-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20240719.1241.008.html>.
- [22] Hübner S, Korol A B, Schmid K J. RNA-Seq analysis identifies genes associated with differential reproductive success under drought-stress in accessions of wild barley *Hordeum spontaneum*. *BMC Plant Biology*, 2015, 15(3): 134–149.
- [23] Han C, Xie W H, Li J G. Effects of salt stress on the osmotic regulation substances of *Haloxylon ammodendron* seedlings. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2014, 37(3): 209–213.
韩超, 谢文华, 李建贵. 盐胁迫对梭梭幼苗渗透调节物质含量的影响. *新疆农业大学学报*, 2014, 37(3): 209–213.
- [24] Hai X. Physiological mechanisms of spermidine alleviating salt stress in oat. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
海霞. 亚精胺缓解燕麦盐胁迫的生理机制研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [25] Pattanagul W, Thitisaksakul M. Effect of salinity stress on growth and carbohydrate metabolism in three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity tolerance. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2008, 46(10): 736–742.
- [26] Tang Z Y, Du Y, Yang H B, *et al.* Changes of endogenous hormone contents and expression analysis of related genes in leaves of tea plants under heat and drought stresses. *Journal of Tea Science*, 2023, 43(4): 489–500.
唐子贻, 杜玥, 杨宏斌, 等. 高温和干旱胁迫下茶树叶片内源激素含量变化及其相关基因的表达分析. *茶叶科学*, 2023, 43(4): 489–500.
- [27] Peleg Z, Blumwald E. Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology*,

- 2011, 14(3): 290–295.
- [28] Yao M H, Liu L, Zeng Y L. Several kinds of phytohormone in plants responses to salt-stress. *Biotechnology Bulletin*, 2011(11): 1–5, 25.
姚曼红, 刘琳, 曾幼玲. 五大类传统植物激素对植物响应盐胁迫的调控. *生物技术通报*, 2011(11): 1–5, 25.
- [29] Zhou Y J, Liu Y, Zhao D H, *et al.* Study on content change of endogenous hormones in *Thellungiella halophilla* and *Arabidopsis thaliana* under salt stress. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007(6): 657–660.
周宜君, 刘玉, 赵丹华, 等. 盐胁迫下盐芥和拟南芥内源激素质量分数变化的研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007(6): 657–660.
- [30] Zhao Y K, Wang T, Zhang W S, *et al.* SOS3 mediates lateral root development under low salt stress through regulation of auxin redistribution and maxima in *Arabidopsis*. *New Phytologist*, 2010, 189(4): 1122–1134.
- [31] Zhou H B, Wang Y C, Shi S L, *et al.* Effects of NaCl stress on the content of endogenous hormones in *Reaumuria trigyna* seedling. *Journal of Inner Mongolia University*, 2010, 41(5): 531–535.
周红兵, 王迎春, 石松利, 等. NaCl胁迫对盐生植物长叶红砂幼苗内源激素的影响. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(5): 531–535.
- [32] Sun R Z, Jiang G B, Wu X Y, *et al.* Response of endogenous hormone in apoplast of two poplars to salt stress. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(2): 62–66, 73.
孙若峥, 姜国斌, 吴祥云, 等. 2种杨树嫩茎质外体内源激素对盐胁迫的响应. *甘肃农业大学学报*, 2013, 48(2): 62–66, 73.
- [33] Li H Y, Li A X, Wang C, *et al.* Effects of salt stress on endogenous hormone contents in sunflower seedlings. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 92–97.
李海洋, 李爱学, 王成, 等. 盐胁迫对苗期向日葵内源激素含量的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 92–97.
- [34] Hartung W, Schraut D, Jiang F. Physiology of abscisic acid (ABA) in roots under stress—a review of the relationship between root ABA and radial water and ABA flows. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2005, 56(11): 1253–1259.
- [35] Xiao Q, Wang G, Yi Y J, *et al.* Enhancing the salt tolerance of sweet potato seedlings through exogenous abscisic acid. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2016, 22(1): 201–208.
肖强, 王刚, 衣艳君, 等. 外源脱落酸增强甘薯幼苗耐盐性的作用. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 201–208.
- [36] Sha H J, Liu H L, Wang J G, *et al.* Physiological mechanism of salicylic acid regulating salt tolerance of crops. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(3): 80–88.
沙汉景, 刘化龙, 王敬国, 等. 水杨酸调控作物耐盐性生理机制. *东北农业大学学报*, 2017, 48(3): 80–88.
- [37] Li T X, Hu Y T, Wei X, *et al.* Simultaneous determination of three endogenous hormones in *Lonicera japonica* under salt-alkali stress by UPLC-MS/MS. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(11): 229–233.
李天雪, 胡玉涛, 韦笑, 等. 超高效液相色谱—串联质谱同时测定盐碱胁迫金银花中3种内源激素. *江苏农业科学*, 2019, 47(11): 229–233.
- [38] Daszkowska-golec A, Szarejko I. Open or close the gate-stomata action under the control of phytohormones in drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 138.
- [39] Avchenko T, Kolla V A, Wang C Q, *et al.* Functional convergence of oxylipin and abscisic acid pathways controls stomatal closure in response to drought. *Plant Physiology*, 2014, 164(3): 1151–1160.
- [40] Li Q Y. Responses of strawberry to salt stress and its regulation. Baoding: Hebei Agricultural University, 2005.
李青云. 草莓对盐胁迫的反应及调控研究. 保定: 河北农业大学, 2005.