

王 博,陈震霄,王壮伟,等. NaCl 胁迫下不同耐盐性葡萄砧木根系分泌物中有机酸组分差异及调控耐盐性有机酸筛选[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(12): 2430-2438.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.12.015

NaCl 胁迫下不同耐盐性葡萄砧木根系分泌物中有机酸组分差异及调控耐盐性有机酸筛选

王 博, 陈震霄, 王壮伟, 王西成

(江苏省农业科学院果树研究所, 江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 为探究有机酸组分调控葡萄砧木耐盐性的生理机制,本研究以耐盐性较强的葡萄砧木 101-14 和较弱的 5BB 为试验材料,采用水培收集法与土培原位收集法两种方式,设置 NaCl 胁迫处理,利用液质联用技术对有机酸进行定性和定量分析。结果表明,培养方式显著影响根系分泌物组分,NaCl 胁迫下,水培收集法收集的葡萄砧木 101-14 与 5BB 根系分泌物中有机酸种类显著高于土培原位收集法 ($P < 0.05$),且不同培养方式获得的根系分泌物中存在特异性有机酸。综合两种培养方式,无 NaCl 胁迫条件下,葡萄砧木 101-14 与 5BB 根系分泌物中有机酸含量存在显著差异,含量差异有机酸主要为 DL-3-苯基乳酸、山楂酸和牛磺酸。NaCl 胁迫条件下,葡萄砧木 101-14 根系分泌物中泛酸含量显著高于葡萄砧木 5BB,而山楂酸含量则显著低于葡萄砧木 5BB。NaCl 胁迫条件下,葡萄砧木 101-14 根系分泌物中水杨酸、顺式-乌头酸和壬二酸含量显著高于无 NaCl 胁迫对照。综上,本研究结果揭示了不同耐盐性葡萄砧木根系分泌物中有机酸组分的差异,筛选出泛酸、水杨酸、顺式-乌头酸和壬二酸等可能调控葡萄耐盐性的候选有机酸,为阐明有机酸介导的葡萄耐盐生理机制提供了理论基础。

关键词: 葡萄砧木; 根系分泌物; 有机酸; 耐盐性

中图分类号: S663.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)12-2430-09

Differences in organic acid components of root exudates among grapevine rootstocks with different salt tolerances under NaCl stress and screening of organic acids regulating salt tolerance

WANG Bo, CHEN Zhenxiao, WANG Zhuangwei, WANG Xicheng

(*Institute of Pomology, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement, Nanjing 210014, China*)

Abstract: To explore the physiological mechanism of organic acid components regulating salt tolerance in grapevine rootstocks, this study used grapevine rootstocks 101-14 (with strong salt tolerance) and 5BB (with weak salt tolerance) as experimental materials, adopted two methods of hydroponic collection and in-situ collection, set up NaCl stress treatments, and used liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) technology for qualitative and quantitative analysis of organic acids. The results showed that the culture method significantly affected the components of root exudates. Under NaCl stress,

收稿日期: 2025-05-29

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(24)3054]

作者简介: 王 博(1987-), 女, 吉林吉林人, 博士, 助理研究员, 主要从事葡萄栽培与微生态研究。(E-mail) bobilelei@163.com

通讯作者: 王西成, (E-mail) wxcown@163.com

the types of organic acids in root exudates of 101-14 and 5BB collected by the hydroponic collection method were significantly higher than those collected by the in-situ collection method ($P < 0.05$), and there were specific organic acids in root exudates obtained by different culture methods. Combining the two culture methods, under non-NaCl stress conditions, there were significant differences in the contents

of organic acids secreted by the roots of 101-14 and 5BB, and the organic acids with content differences were mainly DL-3-phenyllactic acid, maslinic acid and taurine. Under NaCl stress, the content of pantothenic acid in root exudates of 101-14 was significantly higher than that of 5BB, while the content of maslinic acid was significantly lower than that of 5BB. Under NaCl stress, the contents of salicylic acid, *cis*-aconitic acid and azelaic acid in root exudates of 101-14 were significantly higher than those of the non-NaCl stress control group. In conclusion, this study reveals the differences in organic acid components in root exudates of grapevine rootstocks with different salt tolerances, and identifies candidate organic acids, such as pantothenic acid, salicylic acid, *cis*-aconitic acid and azelaic acid, that regulate grape salt tolerance, thereby providing a theoretical basis for clarifying the physiological mechanism of grapevine salt tolerance mediated by organic acids.

Key words: grapevine rootstocks; root exudates; organic acids; salt tolerance

盐分胁迫是制约植物生长和作物产量的关键环境因子,严重威胁农业可持续发展与粮食安全。植物在长期进化过程中形成了多种盐胁迫适应机制,包括胁迫信号识别与转导、离子稳态重建及渗透平衡调控等^[1-3]。根系分泌物的释放也是植物响应盐胁迫的重要途径^[4-5]。根系分泌物是植物向根际释放的有机与无机物质,是植物与环境相互作用的主要载体^[6]。根系分泌物既可调控土壤养分含量与酶活性,参与根际养分循环^[7],又可作为化学信号调控根际微生物群落的结构和功能^[8],最终影响植物生长。非生物胁迫会改变根系分泌物的组成与含量,根系分泌物中糖类、氨基酸、黄酮类及有机酸等组分均会对胁迫产生响应,其中有机酸对胁迫的响应极为敏感^[9]。

葡萄为重要的经济果树,但气候变迁及不合理农事活动导致葡萄园区土壤盐渍化日趋严重,制约葡萄产业高质量发展^[10-11]。现有研究多聚焦于葡萄耐盐性评价、生理特征、转录调控和表观遗传调控等层面^[12-14],然而,关于盐胁迫如何影响葡萄根系分泌物组成与含量的系统性研究尚未见报道。前期研究结果表明,耐盐性差异显著的葡萄砧木 101-14 与 5BB 根际微生物组成与功能存在显著差异^[15],推测该现象与根系分泌物差异相关。因此本研究拟采用原位收集法与水培收集法两种方式收集根系分泌物,利用液相色谱-质谱联用技术系统(LC-MS/MS)分析 NaCl 胁迫下葡萄砧木根系分泌有机酸的组成特征与含量差异,以期深入解析葡萄耐盐机制,为葡萄产业盐渍化土壤改良及耐盐栽培提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为 1 年生葡萄砧木 101-14 (*Vitis riparia* × *V. rupestris*) 和 5BB (*V. berlandieri* × *V. riparia*) 扦插苗,其中 101-14 耐盐性较强,5BB 耐盐性较弱^[16]。试验材

料于江苏省农业科学院葡萄试验园盆栽培养,培养过程避雨。待葡萄苗木长至 6~7 片叶,选取长势一致的葡萄苗 48 株,其中 24 株葡萄苗去除根系表面土壤,根系洗净后转移至超纯水中进行水培,其余 24 株葡萄苗继续在盆中土培。将所有葡萄苗移入人工气候室,室温 22 ℃,光照 12 h/黑暗 12 h。外源添加 100 mmol/L NaCl 溶液模拟盐胁迫,每 48 h 处理 1 次,以超纯水作为对照。第 5 次处理后 48 h 收集根系分泌物。试验处理设置如表 1 所示,每处理设 3 次生物学重复,每重复包含 2 株葡萄苗。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	培养方式
CK1	水培对照,无 NaCl 胁迫
T1	水培+NaCl 胁迫
CK2	土培对照,无 NaCl 胁迫
T2	土培+NaCl 胁迫

1.2 试验方法

1.2.1 水培葡萄根系分泌物收集方法 葡萄根系分泌物收集方法参照 Wang 等^[17]的方法并稍作改进。具体操作如下:将单株葡萄苗置于装有 1 L 超纯水的容器中,用黑色塑料袋包裹容器形成避光环境,利用增氧泵通气,每 45 min 通气 15 min。设 3 个生物学重复,每个重复包括 2 个水培葡萄苗的根系分泌物溶液。

1.2.2 土培葡萄根系分泌物收集方法 在盆壁钻孔直达根系,将土壤溶液取样器(荷兰 Rhizon 公司产品)采样头插入葡萄根系处,土壤溶液取样器连接管与注射器相连。将无菌注射器活塞向外拉出,用支撑板固定活塞位置,使其不能回弹,注射器内形成负压,土壤溶液通过连接管自动流入注射器。每盆钻 3 个通道,设 3 个生物学重复,每个重复包括 2

个盆栽葡萄苗的根系分泌物溶液。

1.2.3 根系分泌物溶液浓缩方法 取 50 mL 根系分泌物进行冷冻干燥,加入 250 μ L 70% 甲醇涡旋 3 min,于 4 $^{\circ}$ C、12 000 r/min 离心 10 min,上清液置于 -20 $^{\circ}$ C 冰箱中静置 30 min,再次离心 10 min,吸取 180 μ L 上清液待测。

1.2.4 液相色谱-质谱联用技术系统(LC-MS/MS)参数设置 采用液相色谱-质谱联用技术系统(LC-MS/MS)(型号 AB Sciex QTRAP[®] 6500,美国 SCIEX 公司产品)检测根系分泌物中有机酸的组成及含量,仪器由 Analyst 1.6 软件控制。色谱条件:色谱柱为 Waters ACQUITY HSS T3 (2.1 mm \times 100.0 mm, 1.8 μ m);流动相 A 为 0.05% 甲酸水溶液,流动相 B 为含 0.05% 甲酸的乙腈溶液;梯度洗脱程序:0~8.0 min,B 相由 5% 升至 95%;8.0~9.5 min,保持 95% B 相;9.6~12.0 min,回落至 5% B 相;流速 0.35 mL/min,柱温 40 $^{\circ}$ C,进样量 2 μ L。质谱条件:电喷

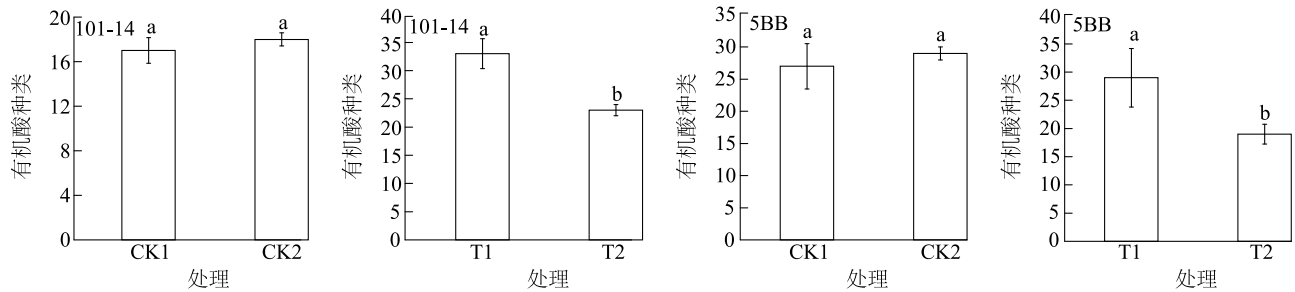
雾离子源(ESI),正负离子双模式;离子源温度 550 $^{\circ}$ C,正离子模式电压 5 500 V,负离子模式电压 -4 500 V,气帘气压力 35 Pa,采用多反应监测模式(MRM)进行定量分析。

1.2.5 数据分析 差异代谢物的筛选采用差异倍数(FC)法,即 $FC = \text{处理组平均值} / \text{对照组平均值}$ 。当 $FC \geq 2.0$ 或 $FC \leq 0.5$ 时,认为差异显著。若对照组平均值为 0,则 FC 无法计算,以 Inf(无穷大)表示。

2 结果与分析

2.1 不同培养方式对葡萄砧木根系分泌物中有机酸种类的影响

如图 1 所示,CK1 和 CK2 中葡萄砧木 101-14、5BB 根系分泌物中有机酸种类均无显著差异($P > 0.05$)。T1 处理中 101-14 与 5BB 有机酸种类显著高于 T2 处理($P < 0.05$)。表明 NaCl 胁迫条件下,水培葡萄根系分泌物中检测到的有机酸种类显著高于土培。



CK1:水培对照;T1:水培+NaCl胁迫;CK2:土培对照;T2:土培+NaCl胁迫。图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同处理葡萄砧木 101-14 和 5BB 根系分泌物中有机酸种类

Fig.1 Types of organic acids in root exudates of grapevine rootstocks 101-14 and 5BB under different treatments

如表 2 所示,在无 NaCl 胁迫条件下,水培葡萄砧木 101-14 根系分泌物特有的有机酸为辛二酸、3-甲基己二酸、齐墩果酸、邻羟基苯乙酸、4-羟基马尿酸、3-(3-羟基苯基)-3-羟基丙酸;土培葡萄砧木 101-14 根系分泌物特有的有机酸为 L-苹果酸、 α -酮戊二酸、鼠尾草酸、没食子酸、咖啡酸、水杨酸。

如表 3 所示,在 NaCl 胁迫条件下,水培葡萄砧木 101-14 根系分泌物特有的有机酸为 (R)-3-羟基丁酸、辛二酸、2-羟基-3-甲基丁酸、3-羟基-3-甲基谷氨酸、甲基丙二酸、3-甲基己二酸、3-吡啶乙酸、4-羟基马尿酸、邻羟基苯乙酸、3-(4-羟基苯基)乳酸、齐墩果酸、3-(3-羟基苯基)-3-羟基丙酸、吡啶-3-乙酸;土培葡萄砧木 101-14 根系分泌物特有的有机酸为 L-苹果酸、鼠尾草酸、没食子酸。

如表 4 所示,在无 NaCl 胁迫条件下,水培葡萄砧木 5BB 根系分泌物特有的有机酸为苯甲酸、辛二酸、4-氨基丁酸、3-甲基己二酸;土培葡萄砧木 5BB 根系分泌物特有的有机酸为 α -酮戊二酸、没食子酸、肉桂酸。

如表 5 所示,在 NaCl 胁迫条件下,水培葡萄砧木 5BB 根系分泌物特有的有机酸为酒石酸、(R)-3-羟基丁酸、戊二酸、3-甲基己二酸、辛二酸、3-羟基-3-甲基谷氨酸、邻羟基苯乙酸、3-(4-羟基苯基)乳酸、乳酸、2-羟基-3-甲基丁酸、DL-3-苯基乳酸、马尿酸、4-羟基马尿酸、吡啶-3-乙酸;土培葡萄砧木 5BB 根系分泌物特有的有机酸为鼠尾草酸、L-焦谷氨酸、没食子酸。

值得注意的是,与水培相比,土培葡萄砧木根系分泌物中均特异性富集没食子酸。

表 2 无 NaCl 胁迫下水培和土培中葡萄砧木 101-14 根系分泌物中特有有机酸种类及含量

Table 2 Types and contents of specific organic acids in root exudates of grapevine rootstock 101-14 under hydroponic and soil cultivation in the absence of NaCl stress

处理	有机酸	
	种类	含量 (ng/mL)
CK1	辛二酸	0.600
	3-甲基己二酸	0.113
	齐墩果酸	0.034
	邻羟基苯乙酸	0.014
	4-羟基马尿酸	0.010
	3-(3-羟基苯基)-3-羟基丙酸	0.006
CK2	L-苹果酸	13.022
	α -酮戊二酸	4.122
	鼠尾草酸	3.063
	没食子酸	0.052
	咖啡酸	0.027
	水杨酸	0.017

CK1: 水培对照; CK2: 土培对照。

表 3 NaCl 胁迫下水培和土培中葡萄砧木 101-14 根系分泌物中特有有机酸种类及含量

Table 3 Types and contents of specific organic acids in root exudates of grapevine rootstock 101-14 under NaCl stress in hydroponic and soil cultivation systems

处理	有机酸	
	种类	含量 (ng/mL)
T1	(R)-3-羟基丁酸	56.655
	辛二酸	1.216
	2-羟基-3-甲基丁酸	0.562
	3-羟基-3-甲基谷氨酸	0.320
	甲基丙二酸	0.264
	3-甲基己二酸	0.112
	3-吡啶乙酸	0.069
	4-羟基马尿酸	0.038
	邻羟基苯乙酸	0.028
	3-(4-羟基苯基)乳酸	0.020
	齐墩果酸	18.903
	3-(3-羟基苯基)-3-羟基丙酸	0.006
	吡啶-3-乙酸	0.006
	T2	L-苹果酸
鼠尾草酸		1.329
没食子酸		0.096

T1: 水培+NaCl 胁迫; T2: 土培+NaCl 胁迫。

表 4 无 NaCl 胁迫下水培和土培中葡萄砧木 5BB 根系分泌物中特有有机酸种类及含量

Table 4 Types and contents of specific organic acids in root exudates of grapevine rootstock 5BB under hydroponic and soil cultivation in the absence of NaCl stress

处理	有机酸	
	种类	含量 (ng/mL)
CK1	苯甲酸	4.919
	辛二酸	0.897
	4-氨基丁酸	0.221
	3-甲基己二酸	0.122
CK2	α -酮戊二酸	3.146
	没食子酸	0.185
	肉桂酸	0.029

CK1: 水培对照; CK2: 土培对照。

表 5 NaCl 胁迫下水培和土培中葡萄砧木 5BB 根系分泌物中特有有机酸种类及含量

Table 5 Types and contents of specific organic acids in root exudates of grapevine rootstock 5BB under NaCl stress in hydroponic and soil cultivation systems

处理	有机酸	
	种类	含量 (ng/mL)
T1	酒石酸	30.970
	(R)-3-羟基丁酸	14.125
	戊二酸	0.981
	3-甲基己二酸	0.062
	辛二酸	0.602
	3-羟基-3-甲基谷氨酸	0.051
	邻羟基苯乙酸	0.018
	3-(4-羟基苯基)乳酸	0.009
	乳酸	220.920
	2-羟基-3-甲基丁酸	1.142
	DL-3-苯基乳酸	0.033
	马尿酸	0.020
	4-羟基马尿酸	0.014
	吡啶-3-乙酸	0.002
T2	鼠尾草酸	1.575
	L-焦谷氨酸	0.334
	没食子酸	0.036

T1: 水培+NaCl 胁迫; T2: 土培+NaCl 胁迫。

2.2 不同葡萄砧木根系分泌有机酸种类的差异

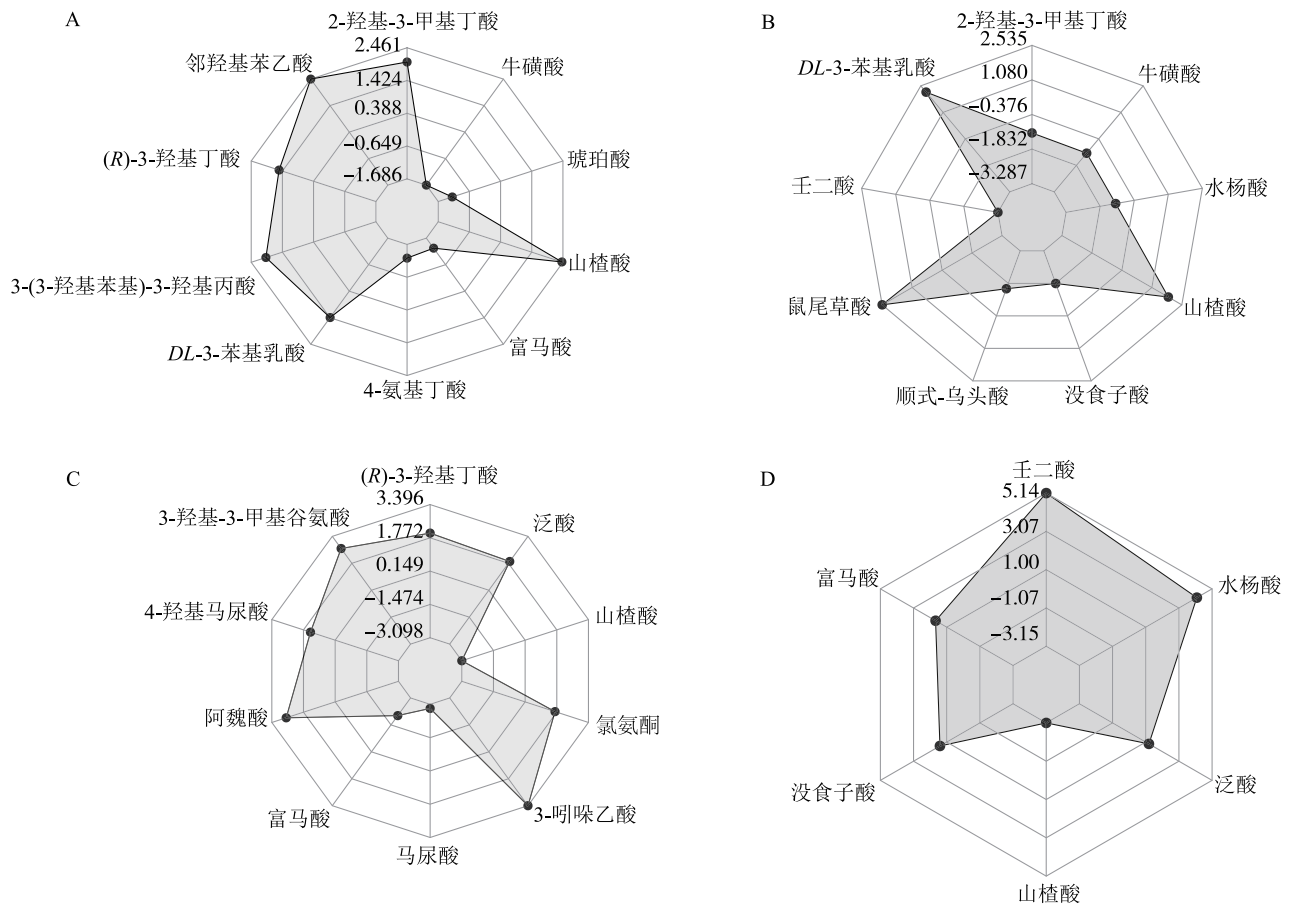
如图 2 所示, 水培对照 (CK1) 条件下, 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中邻羟基苯乙酸、山楂酸、2-羟基-3-甲基丁酸、3-(3-羟基苯基)-3-羟基丙酸、(R)-

3-羟基丁酸、*DL*-3-苯基乳酸含量显著高于葡萄砧木 5BB; 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中琥珀酸、4-氨基丁酸、富马酸、牛磺酸含量显著低于葡萄砧木 5BB。土培对照(CK2)条件下, 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中鼠尾草酸、*DL*-3-苯基乳酸与山楂酸含量显著高于葡萄砧木 5BB; 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中 2-羟基-3-甲基丁酸、牛磺酸、水杨酸、顺式-乌头酸、没食子酸、壬二酸含量显著低于葡萄砧木 5BB。

水培+NaCl 胁迫(T1)条件下, 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中 3-吡啶乙酸、3-羟基-3-甲基谷氨酸、阿魏酸、(*R*)-3-羟基丁酸、泛酸、氯氨酮、4-羟基马尿酸含量显著高于葡萄砧木 5BB; 葡萄砧木 101-14 根系分

泌物中富马酸、马尿酸与山楂酸含量显著低于葡萄砧木 5BB。土培+NaCl 胁迫(T2)条件下, 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中壬二酸、水杨酸、富马酸、没食子酸、泛酸含量显著高于葡萄砧木 5BB; 葡萄砧木 101-14 根系分泌物中山楂酸含量显著低于葡萄砧木 5BB。

在无 NaCl 胁迫条件下, 水培和土培葡萄砧木 101-14 和 5BB 根系分泌物间同时存在 4 种含量差异有机酸, 分别为 *DL*-3-苯基乳酸、山楂酸、牛磺酸和 2-羟基-3-甲基丁酸。在 NaCl 胁迫条件下, 水培和土培葡萄砧木 101-14 和 5BB 根系分泌物间根系分泌物间同时存在 3 种含量差异有机酸, 分别为泛酸、山楂酸、富马酸。



A: 水培对照(CK1); B: 土培对照(CK2); C: 水培+NaCl 胁迫(T1); D: 土培+NaCl 胁迫(T2)。图中仅展示 $|\log_2 FC|$ 值排名前 10 的含量差异有机酸。FC: 有机酸含量差异倍数。

图 2 不同条件下葡萄砧木 101-14 和 5BB 根系分泌物中含量差异有机酸

Fig.2 Organic acids with differential content in root exudates of grapevine rootstocks 101-14 and 5BB under different conditions

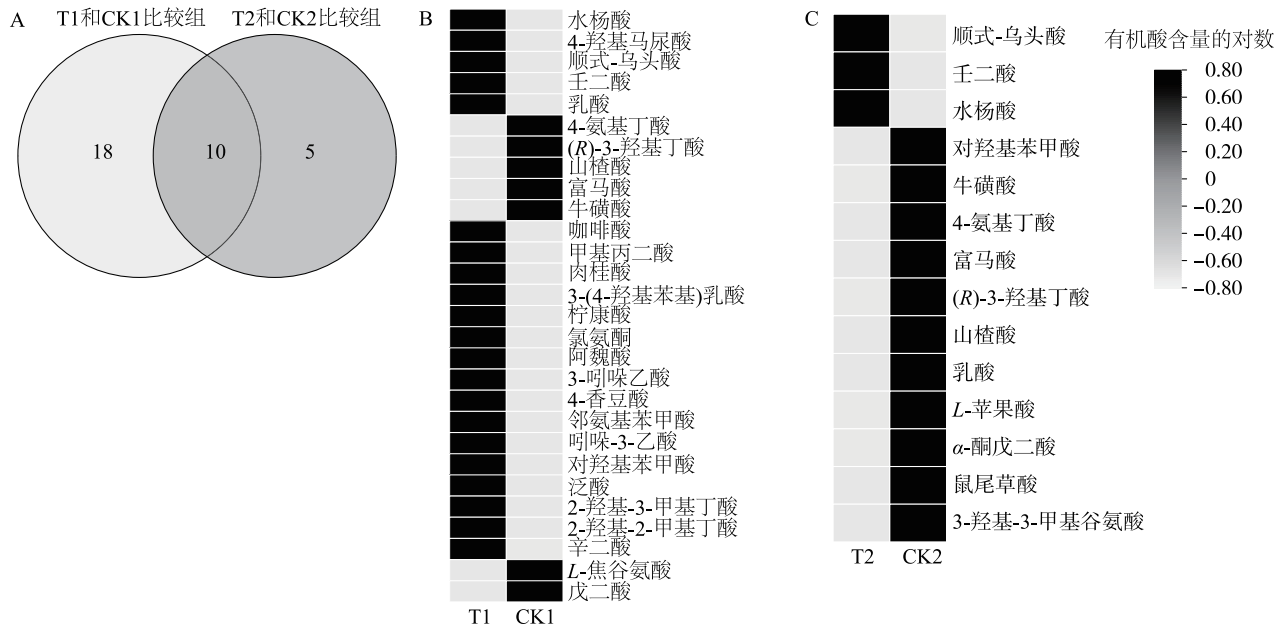
2.3 盐胁迫对葡萄砧木根系分泌物中有机酸种类的影响

如图 3 所示, 对于葡萄砧木 101-14, 无 NaCl 胁

迫条件下, 土培和水培比较组中, 根系分泌物中含量差异有机酸有 28 种; NaCl 胁迫条件下, 土培和水培比较组中, 根系分泌物中含量差异有机酸有 15 种; 2

个比较组共有的含量差异有机酸共有 10 种。2 个比较组共有的 10 种含量差异有机酸中,水培+NaCl 胁迫处理(T1)根系分泌物中水杨酸、4-羟基马尿酸、顺式-乌头酸、壬二酸、乳酸含量显著高于水培对照(CK1);水培+NaCl 胁迫处理(T1)根系分泌物中 4-氨基丁酸、(R)-3-羟基丁酸、山楂酸、富马酸、牛磺

酸含量显著低于水培对照(CK1)。土培+NaCl 胁迫处理(T2)根系分泌物中顺式-乌头酸、壬二酸与水杨酸含量显著高于土培对照(CK2);土培+NaCl 胁迫处理(T2)根系分泌物中羟基苯甲酸、牛磺酸、4-氨基丁酸、富马酸、(R)-3-羟基丁酸、山楂酸、乳酸含量显著低于土培对照(CK2)。



CK1:水培对照;T1:水培+NaCl 胁迫;CK2:土培对照;T2:土培+NaCl 胁迫。

图 3 NaCl 胁迫对葡萄砧木 101-14 根系分泌物中有机酸种类的影响

Fig.3 Effects of NaCl stress on the types of organic acids in root exudates of grapevine rootstock 101-14

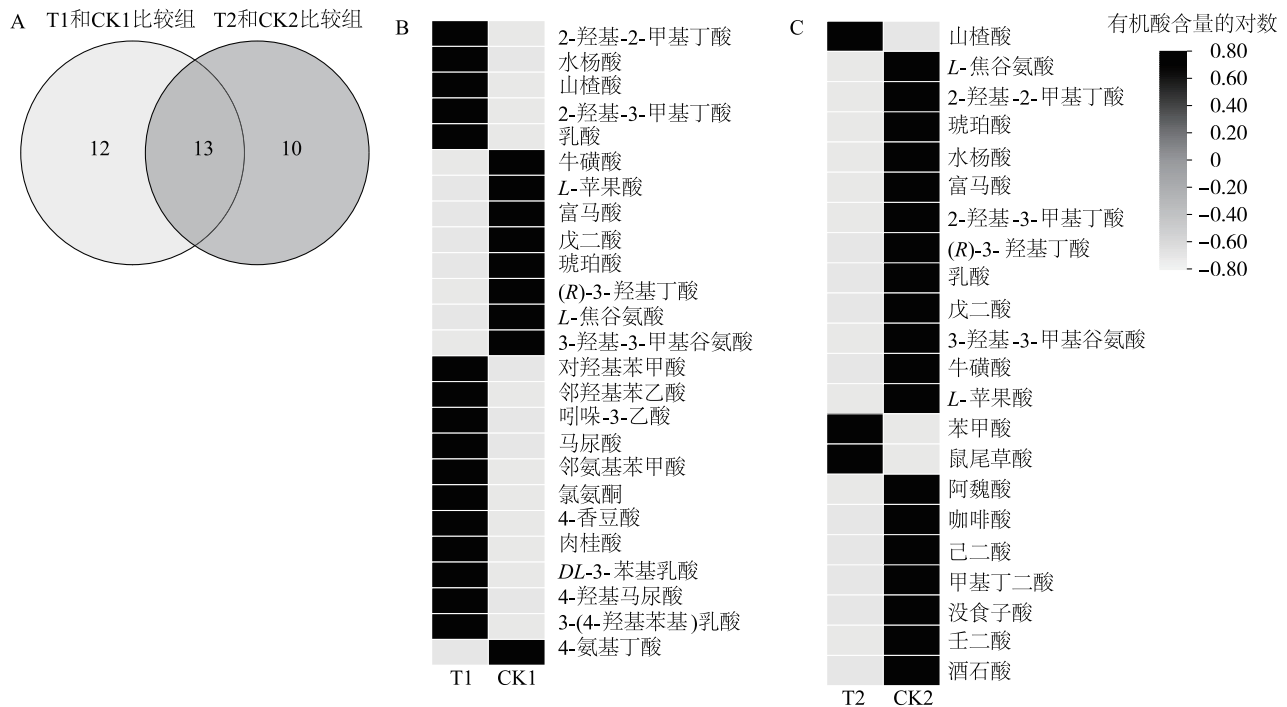
综上,在两种不同的根系分泌物收集方法中,NaCl 胁迫条件下葡萄砧木 101-14 根系分泌物中顺式-乌头酸、壬二酸与水杨酸含量均显著高于无 NaCl 胁迫对照;NaCl 胁迫条件下葡萄砧木 101-14 根系分泌物中 4-氨基丁酸、(R)-3-羟基丁酸、山楂酸、富马酸、牛磺酸含量显著低于无 NaCl 胁迫对照。

如图 4 所示,对于葡萄砧木 5BB,无 NaCl 胁迫条件下土培和水培比较组中,根系分泌物中含量差异有机酸有 25 种;NaCl 胁迫条件下土培和水培比较组中,根系分泌物中含量差异有机酸有 23 种;2 个比较组共有的含量差异有机酸有 13 种。2 个比较组共有的 13 种有机酸中,水培+NaCl 胁迫处理(T1)根系分泌物中 2-羟基-2-甲基丁酸、水杨酸、山楂酸、2-羟基-3-甲基丁酸和乳酸含量显著高于水培+NaCl 胁迫水培对照(CK1);水培+NaCl 胁迫处

理(T1)根系分泌物中 3-羟基-3-甲基谷氨酸、L-焦谷氨酸、(R)-3-羟基丁酸、戊二酸、琥珀酸、L-苹果酸、富马酸和牛磺酸含量显著低于水培对照(CK1)。

土培+NaCl 胁迫处理(T2)根系分泌物中山楂酸含量显著高于土培对照(CK2);土培+NaCl 胁迫处理(T2)根系分泌物中 L-焦谷氨酸、2-羟基-2-甲基丁酸、琥珀酸、水杨酸、富马酸、2-羟基-3-甲基丁酸、(R)-3-羟基丁酸、乳酸、戊二酸、3-羟基-3-甲基谷氨酸、牛磺酸、L-苹果酸含量显著低于土培对照(CK2)。

综上,在两种不同的根系分泌物收集方法中,NaCl 胁迫条件下葡萄砧木 5BB 根系分泌物中山楂酸含量显著高于无 NaCl 胁迫对照;NaCl 胁迫条件下葡萄砧木 5BB 根系分泌物中 3-羟基-3-甲基谷氨酸、(R)-3-羟基丁酸、琥珀酸、戊二酸、L-苹果酸、富马酸、牛磺酸含量显著低于无 NaCl 胁迫对照。



CK1:水培对照;T1:水培+NaCl胁迫;CK2:土培对照;T2:土培+NaCl胁迫。

图4 NaCl胁迫对葡萄砧木5BB砧木根系分泌物中有机酸种类的影响

Fig.4 Effects of NaCl stress on the types of organic acids in root exudates of grapevine rootstock 5BB

3 讨论与结论

3.1 培养方式对葡萄砧木根系分泌物中有机酸种类的影响

根系分泌物的收集是解析其成分的关键环节。目前根系分泌物收集方法主要包括溶液培养收集法、土培收集法、基质培养收集法,优点为操作简便、成本较低,但是这些方法都需要将植物从原生境中取出,通过溶液浸泡提取根系分泌物^[18]。根系分泌物原位收集法可以弥补上述方法的缺点,但存在成本高,操作复杂等缺点。鉴于不同收集方式各自的特点,为了使研究结果更加可靠,本研究采用了水培收集法和土培原位收集法两种根系分泌物收集方式。研究表明,CK1和CK2的葡萄砧木101-14与5BB根系分泌物有机酸种类均无显著差异($P>0.05$)。T1处理的葡萄砧木101-14与5BB根系分泌物有机酸种类显著高于T2处理($P<0.05$)。这可能是由于土壤对外源NaCl具有缓冲作用,使土培条件下根系受到的胁迫相对较弱;而水培条件下,根系直接暴露于盐溶液中,导致根系分泌更多种类的有机酸。

前人研究表明,盐碱、干旱等非生物胁迫均可影响根系分泌物有机酸组分^[19-21],同时收集介质也会显著影响根系分泌物组分^[22]。本研究中,不同培养方式获得的根系分泌物中存在特异性有机酸。因此,在开展根系分泌物相关研究时,需充分考虑培养方式造成的组分差异,以保障研究结果的科学性与可靠性。

3.2 不同葡萄砧木根系分泌物中有机酸种类的差异

在木薯、小麦、香蕉等多种作物中发现,植物根系分泌物的组分与含量具有明显的品种特异性^[23-25]。Gu等^[26]在4个烟草品种根系分泌物中鉴定出29种差异代谢物,这些差异代谢物显著影响了根际土壤环境。不同烟草青枯病抗性品种间根系分泌物也存在差异^[27]。本研究发现,综合两种培养方式,无NaCl胁迫条件下,葡萄砧木101-14与5BB根系分泌的有机酸含量存在显著差异,含量差异有机酸主要为DL-3-苯基乳酸、山楂酸和牛磺酸。NaCl胁迫条件下,葡萄砧木101-14根系分泌物中泛酸含量显著高于5BB,而山楂酸含量则显著低于5BB。泛酸(维生素B5)作为植物体内广泛存在的维生素

B 族成员,其合成与耐盐性密切相关,如 *OsBCAT2* 基因通过促进泛酸合成可提高水稻耐盐性^[28-29]。维生素 B12 也被证实参与大青花的盐胁迫响应^[30]。值得注意的是,山楂酸在植物耐盐方面的功能尚未见报道,需进一步探究。

3.3 盐胁迫对葡萄砧木根系分泌物中有机酸种类的影响

有机酸是植物根系响应盐胁迫的重要分泌物^[20,31]。耐盐型柑橘根系分泌物中水杨酸含量显著高于盐敏感型柑橘^[32]。本研究结果表明,土培+NaCl 胁迫条件下,葡萄砧木 101-14 根系分泌物中水杨酸含量显著高于 5BB。水杨酸可通过改善植物光合性能、增强抗氧化能力、维持离子稳态等途径提高植物耐盐性^[33-34]。同时,有机酸还能调控根际微生物群落间接提高植物耐盐性,盐胁迫下,补血草根系分泌 2-甲基丁酸、棕榈酸、油酸和硬脂酸等有机酸能促进促生菌 *Bacillus flexus* KLBMP 4941 定殖^[35],水杨酸与促生菌可协同减轻玉米的盐胁迫损伤^[36]。此外,水杨酸对葡萄根际微生物群落具有调控作用^[17]。

NaCl 胁迫条件下,葡萄砧木 101-14 根系分泌物中顺式-乌头酸含量显著高于无 NaCl 胁迫对照。该有机酸可提高土壤中有效锌含量^[37],而纳米锌能增强紫花苜蓿耐盐性^[38],但其对葡萄耐盐性的作用机制有待进一步探究。NaCl 胁迫条件下,葡萄砧木 101-14 根系分泌物中壬二酸显著含量高于无 NaCl 胁迫对照。作为脂质过氧化产物,壬二酸在植物免疫调控与生长发育过程中发挥重要作用,响应多种生物胁迫^[39]。外源壬二酸可提高烟草抗氧化系统活性,并通过诱导植物激素信号通路相关基因的表达,进而激活植物抗病防御反应^[40]。此外,还发现壬二酸可能对二氧化钛纳米粒子等环境污染物存在响应^[41]。

参考文献:

- [1] WISZNIIEWSKA A, KOZMINSKA A, HANUS-FAJERSKA E, et al. Insight into phytohormonal modulation of defense mechanisms to salt excess in a halophyte and a glycophyte from Asteraceae family [J]. *Plant and Soil*, 2021, 463(1/2): 55-76.
- [2] ZHAO C Z, ZHANG H, SONG C P, et al. Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity [J]. *The Innovation*, 2020, 1(1): 100017.
- [3] JIANG Z H, ZHOU X P, TAO M, et al. Plant cell-surface GIPC sphingolipids sense salt to trigger Ca²⁺ influx [J]. *Nature*, 2019, 572(7769): 341-346.
- [4] VIVES-PERIS V, GOMEZ-CADENAS A, PEREZ-CLEMENTE R M. Citrus plants exude proline and phytohormones under abiotic stress conditions [J]. *Plant Cell Reports*, 2017, 36(12): 1971-1984.
- [5] PAN J, PENG F, TEDESCHI A, et al. Do halophytes and glycophytes differ in their interactions with arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress? a meta-analysis [J]. *Botanical Studies*, 2020, 61(1): 13.
- [6] 吴林坤,林向民,林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 298-310.
- [7] 张海龙,武润琴,李李佳,等. 根系分泌物 C:N 对刺槐林地土壤理化特征和土壤呼吸的影响 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 949-956.
- [8] AFRIDI M S, KUMAR A, JAVED M A, et al. Harnessing root exudates for plant microbiome engineering and stress resistance in plants [J]. *Microbiological Research*, 2024, 279: 127564.
- [9] 李月明,杨帆,韩沛霖,等. 植物根系分泌物响应非生物胁迫机理研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(5): 1384-1392.
- [10] 吴彬,赵文娟. 宁夏贺兰山东麓滴灌葡萄地土壤次生盐渍化的成因与研究定位 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(36): 105-107.
- [11] 齐潇雨,郭艳杰,柳鹭,等. 种植年限对设施葡萄园土壤盐渍化及微生物群落的影响 [J/OL]. *中国农业科技导报*, 2025, 27(6): 218-228.
- [12] 吴梦晓,张晓雪,李众,等. 葡萄砧木的耐盐性评价 [J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2017(5): 14-18.
- [13] JIN Z X, GAO S W, MA W Y, et al. Identification and functional prediction of salt stress-related long noncoding RNAs in grapevine roots [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 179: 104215.
- [14] WANG F B, ZHU H, CHEN D H, et al. A grape bHLH transcription factor gene, *VibHLHI*, increases the accumulation of flavonoids and enhances salt and drought tolerance in transgenic *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 2016, 125(2): 387-398.
- [15] WANG B, WANG X C, WANG Z W, et al. Comparative metagenomic analysis reveals rhizosphere microbial community composition and functions help protect grapevines against salt stress [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1102547.
- [16] 袁军伟,李敏敏,刘长江,等. NaCl 胁迫下葡萄砧木幼苗生长及体内 Cl⁻、Na⁺、K⁺ 的分布动态 [J]. *核农学报*, 2018, 32(12): 2448-2454.
- [17] WANG B, GUO X W, LI K, et al. Effects of Salicylic acid on grape plants and the soil microbial community [J]. *Allelopathy Journal*, 2015, 36(1): 49-61.
- [18] 郭婉娟,张子良,刘庆,等. 根系分泌物收集技术研究进展

- [J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3951-3962.
- [19] 龙吉兰, 蒋 铮, 刘定琴, 等. 干旱下植物根系分泌物及其介导的根际激发效应研究进展[J]. 植物生态学报, 2024, 48(7): 817-827.
- [20] 王雨晴, 马子奇, 侯嘉欣, 等. 盐胁迫下植物根系分泌物的成分分析与生态功能研究进展[J]. 生物技术通报, 2024, 40(1): 12-23.
- [21] 徐炜杰, 郭 佳, 赵 敏, 等. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 1137-1148.
- [22] LIANG Y, LIU J, JIN J Z, et al. Effects of low-molecular-weight organic acids on the transformation and phosphate retention of iron (hydr) oxides [J]. Science of Total Environment, 2024, 940: 173667.
- [23] 董 航, 吴金宝, 秦 开, 等. 不同品种小麦根系分泌物对黄瓜生长、枯萎病发生及病原菌的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(9): 30-38.
- [24] 韩 笑, 张静柔, 贝丽萍, 等. 连作木薯组培苗根系分泌物的鉴定及其化感效应[J]. 西南农业学报, 2023, 36(8): 1653-1661.
- [25] 田丹丹, 周 维, 黄素梅, 等. 不同香蕉品种根系分泌物对香蕉枯萎病致病菌的影响及组成分析[J]. 热带作物学报, 2017, 38(5): 910-914.
- [26] GU M L, JIN J J, LU P, et al. Regulation of root-associated microbiomes and root exudates by different tobacco species [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2024, 11: 151.
- [27] WU K, YUAN S F, XUN G H, et al. Root exudates from two tobacco cultivars affect colonization of *Ralstonia solanacearum* and the disease index[J]. European Journal of Plant Pathology, 2015, 141: 667-677.
- [28] 张潇潇, 裘娟萍. 泛酸生物合成相关酶及其基因的研究进展[J]. 科技通报, 2008(6): 799-805.
- [29] SUN Y Y, ZHOU Y T, LONG Q Y, et al. *OsBCAT2*, a gene responsible for the degradation of branched-chain amino acids, positively regulates salt tolerance by promoting the synthesis of vitamin B5[J]. New Phytologist, 2024, 241(6): 2558-2574.
- [30] WANG Q, WANG Z W, GUAN J Q, et al. Transcriptome analysis reveals the important role of Vitamin B₁₂ in the response of *Natro-norubrum daqingense* to salt stress[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(8): 4168.
- [31] 沈 川, 李 夏. 根系分泌物对不同环境胁迫响应的研究进展[J]. 核农学报, 2024, 38(11): 2247-2257.
- [32] VIVES-PERIS V, MOLINA L, SEGURA A, et al. Root exudates from citrus plants subjected to abiotic stress conditions have a positive effect on rhizobacteria[J]. Journal of Plant Physiology, 2018, 228: 208-217.
- [33] OLIVEIRA V K N, LIMA G S, SOARES M D M, et al. Salicylic acid does not mitigate salt stress on the morphophysiology and production of hydroponic melon [J]. Brazilian Journal of Biology, 2022, 82: e262664.
- [34] JANGRA M, DEVI S, SATPAL, et al. Amelioration effect of salicylic acid under salt stress in *Sorghum bicolor* L.[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2022, 194(10): 4400-4423.
- [35] XIONG Y W, LI X W, WANG T T, et al. Root exudates-driven rhizosphere recruitment of the plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus flexus* KLBMP 4941 and its growth-promoting effect on the coastal halophyte *Limonium sinense* under salt stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 194: 110374.
- [36] ALI Q, AHMAD M, KAMRAN M, et al. Synergistic effects of rhizobacteria and salicylic acid on maize salt-stress tolerance [J]. Plants, 2023, 12(13): 2519.
- [37] 王灵璐. 氮锌配施调控冬小麦根系分泌物提高石灰性土壤锌有效性的机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
- [38] 何与晗. 纳米氧化锌引发对紫花苜蓿种子萌发及幼苗抗盐的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [39] 王 浩, 张松杰, 李 航, 等. 植物壬二酸的研究进展[J]. 植物生理学报, 2022, 58(3): 483-491.
- [40] 卢子琦, 王晓宇, 张松杰, 等. 外源壬二酸对烟草抗氧化系统及转录组的影响[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(3): 104-114.
- [41] SILVA S, RIBEIRO T P, SANTOS C, et al. TiO₂ nanoparticles induced sugar impairments and metabolic pathway shift towards amino acid metabolism in wheat[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 122982.

(责任编辑: 成纾寒)