

曹 凡,陈 燕,谷青青,等. 草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管处理的转录组分析[J]. 江苏农业科学,2024,53(1):20-25.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.01.003

草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管处理的转录组分析

曹 凡,陈 燕,谷青青,郭 聪,吴 玲,徐秋霞,黄 欣,李玉娟

(江苏沿江地区农业科学研究所,江苏南通 226012)

摘要:从转录组层面解析草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管处理的分子机制,以红颜草莓脱毒组培苗不定根为材料,浸入羧基化碳纳米管混悬液中超声处理,进行转录组测序,分析差异表达基因(DEG)并进行 qRT-PCR 验证。转录组测序结果分析发现,有 1 531 个基因受羧基化碳纳米管处理影响上调,1 979 个表达基因下调。GO 功能分析发现,DEG 主要富集于细胞壁重塑、硫酸盐运输、氧化应激反应等生物过程及 DNA 合成、酶催化活性和跨膜蛋白活性等分子功能。KEGG 途径富集分析表明,差异表达基因分别主要参与类黄酮积累途径、苯基丙酸合成、ABC 转运蛋白、MAPK 信号通路及苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸合成等。qRT-PCR 显示差异表达基因的表达谱与 RNA-Seq 分析结果一致。本研究结果可为进一步基于碳纳米管的草莓良种繁育新技术研发提供参考。

关键词:红颜草莓;碳纳米管;转录组测序;植物组织培养

中图分类号:S668.404 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)01-0020-06

草莓是蔷薇科(Rosaceae)草莓属(*Fragaria*)多年生草本植物。栽培草莓不同于野生状态的草莓,是八倍体凤梨草莓^[1]。草莓是重要的浆果果树,果实风味独特,形态颜色诱人,营养价值丰富^[2]。草莓种苗繁育方式单一,通常采用匍匐茎繁育,这也是制约江苏省草莓产业发展的主要因素之一。草莓种苗脱毒技术一般是指利用植物组培技术培育可以保持草莓品种优良性状的种苗,并且克服草莓长期无性繁殖导致的病虫害积累加重、品种退化、质量品质和产量降低等问题。因此,健全的草莓种苗良种繁育体系是促进我省草莓产业不断健康发展的重要保障^[3]。

碳纳米管是一种在高分辨率透射电镜下发现的碳纳米材料,其长度与宽度的比例大于 1 000。碳纳米管的纳米级结构使其具有特殊的机械性能、导

热性能和电学性能,并且可以在试验中改变化学反应或生物结构^[4-6]。在农业、医学等生物技术应用方面,碳纳米管能够作为分子材料的运载体,渗透植物细胞、动物组织、细菌和肿瘤细胞等^[7]。羧基化碳纳米管是一种在碳纳米管表面引入亲水基团的功能化碳纳米材料,该材料相较碳纳米管不但增强了材料分散性、结构稳定性和生物相容性,而且对生物的免疫系统的影响有效降低^[8]。因此,羧基化碳纳米管等碳纳米材料在植物种苗繁育尤其是组培技术上有极大的应用前景,充分了解植物对羧基化碳纳米管响应的分子机理具有重要意义。

本研究以红颜草莓脱毒组培苗为研究材料,通过高通量转录测序筛选 500 $\mu\text{g/mL}$ 羧基化碳纳米管处理下组培苗不定根的差异表达基因并进行 q-PCR 验证,从转录组水平揭示草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管处理的关键基因,为研发基于碳纳米管的草莓良种繁育新技术提供试验基础和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2023 年 2—5 月,选取红颜草莓材料于江苏省南通市海门区春华家庭农场,并在江苏沿江地区农业科学研究所科创中心组培实验室完成红颜草莓组织培养试验。培养基配方:MS 培养基 + 0.1 mg/L 萘

收稿日期:2024-01-09

基金项目:江苏省农业科学院探索性颠覆性创新计划[编号:ZX(21)1231];江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(23)3133];江苏现代农业(草莓)产业技术体系海门推广示范基地项目(编号:JATS[2023]145);江苏沿江地区农业科学研究所博士科技基金[编号:YJBS(2021)004]。

作者简介:曹 凡(1990—),男,江苏南通人,博士,助理研究员,主要从事林果栽培新技术研究。E-mail:caofan90@126.com。

通信作者:李玉娟,研究员,主要从事观赏苗木与栽培技术研究。E-mail:lyglyj90@sohu.edu.cn。

乙酸(NAA) + 0.1 mg/L 吲哚丁酸(IBA)。培养室条件为温度 25 ~ 30 ℃,光照 12 h/d。选取生长良好、长势相近的草莓组培苗备用。

1.2 试验处理

2023 年 7 月,试验设置处理组(CNTs)和对照组(CK),选取上述的红颜草莓组培苗不定根,处理组浸入含有 500 μg/mL 羧基化碳纳米管的纯水混悬液中,对照组直接浸入纯水。处理组和对照组采用超声细胞破碎仪(南京先欧仪器制造有限公司产品)进行振荡,功率 800 W,超声 10 s,间隙 10 s,处理 20 min,使处理组羧基化碳纳米管吸附于根系组织上。试验样品处理后立即放置于液氮中待高通量转录组测序。

1.3 转录组测序

样品采用标准提取方法,从植物组织中提取 RNA,随后采用 Agilent 2100 bioanalyzer 对 RNA 样品完整性和总量进行严格质控。文库构建与质检后,进行上机测序。上机测序采用 Illumina NovaSeq 6000 (Illumina, USA),获得待测片段的序列信息。数据质控软件采用 Fastp (version 0.19.7),对测序原始数据过滤和数据质量汇总。

1.4 差异基因筛选及富集分析

根据红颜草莓参考基因组及其模型的注释文

件^[9],采用 HISAT2 v2.0.5 软件进行参考基因组的索引与比对,采用 StringTie 软件(1.3.3b)进行新基因预测,采用 featureCounts 软件(1.5.0 - p3)计算映射到各个基因的读数,采用 DESeq 2 软件(1.20.0)确定差异表达基因(调整后 P 值 ≤ 0.05)^[10]。通过 clusterProfiler(3.8.1)软件实现差异表达基因的 GO 富集分析和 KEGG 通路中差异表达统计富集。

1.5 qRT - RCR 验证

为了验证转录组测序结果的可靠性,选取 8 个差异表达基因进行 qRT - RCR。以来源于草莓 YABBY 基因家族的 *FvActin* 基因为内参基因^[11],根据各基因序列设计引物(表 1),在实时荧光定量 PCR 仪上检测差异基因表达水平。具体步骤如下:首先使用 gDNA digester Mix 去除基因组 DNA,采用试剂盒(4 × Hifair® III SuperMix plus)进行逆转录反应。之后使用 Hieff® qPCR SYBR Green Master Mix 制备 qRT - PCR 反应体系,然后在荧光定量 PCR 仪上进行试验:95 ℃ 预变性 3 min;95 ℃ 变性 10 s,60 ℃ 退火,延伸 30 s,总共 40 个循环。采用 $2^{-\Delta\Delta C_T}$ 方法计算基因相对表达量^[11]。

1.6 数据处理

使用 Excel 进行数据统计,使用 SPSS 26.0 进行显著性分析,使用 Origin 2018 软件制图。

表 1 引物序列信息

引物名称	引物序列(5'→3')
<i>FvActin</i>	F:GAGGCAATTTAGACGCGCAA;R:GCTCAAGAATGTCAGTGGCG
<i>snap - Fvb1_4_F - processed - gene - 38.17</i>	F:GCTCGTGCTGAAGTCTGCTC;R:ACACTCGCTTTGGTGCTATG
<i>augustus - Fvb2_4_F - processed - gene - 141.20</i>	F:TCTCTTGAGTGTTCCTTTGG;R:TGCTCTGGTCATTCCGCTTTT
<i>maker - Fvb5_1_F - augustus - gene - 23.36</i>	F:CTGCCCAACTCAGTTCCTCG;R:CACCAGTGACTTCTGCTCCCA
<i>maker - Fvb3_4_F - snap - gene - 43.30</i>	F:AGATGGATTATGGGATAAGGTTAGC;R:TGGGAGCCTCGTGATACAGAC
<i>maker - Fvb2_1_F - augustus - gene - 121.34</i>	F:CCGATTTCAGGAAGCATAGCC;R:CAACAATCTGAGGAGCCGAAC
<i>maker - Fvb4_2_F - augustus - gene - 161.43</i>	F:CCAGCAGCCTCATCTTCCAC;R:TGACGACACTGAGACGACCAA
<i>augustus - Fvb6_4_F - processed - gene - 226.12</i>	F:GTTCAACACTGCCTCCAATCCT;R:CCGTGCTACAGTTTAGACCTTCC
<i>maker - Fvb6_3_F - snap - gene - 8.40</i>	F:CTTGCTCTTTACATAGTGGTGCCT;R:TTCTACCGTACCCTTGTCTAGTGC

2 结果与分析

2.1 转录组测序质量分析

利用 Illumina NovaSeq 6000 进行高通量转录组测序,羧基化碳纳米管处理草莓组培苗不定根均得到多条高质量碱基序列(碱基长度 38 841 132 ~ 42 744 978 bp),Q20、Q30 分别达到 97% 以上和 92% 以上,且 G + C 含量达到 45% 以上(表 2),表明草莓组培苗不定根样品的转录组测序质量符合进一步研究的要求。

2.2 差异基因数量分析

以 $|\log_2(\text{Fold Change})| \geq 1$ 且 $P_{\text{adj}} \leq 0.05$ 作为差异基因筛选标准,分别对羧基化碳纳米管处理草莓组培苗不定根的试验组与对照组进行比较。发现共有 3 510 个基因表达发生了改变,有 1 531 个基因受羧基化碳纳米管处理影响上调,1 979 个表达基因下调。

2.3 差异表达基因 GO 富集分析

为了进一步研究差异表达基因在羧基化碳纳米管处理下的生物学功能,进行了 GO 富集分析。

表 2 碱基信息统计结果

样品	过滤前原始数据 (bp)	过滤后有效数据 (bp)	Q20 以上水平的碱基占比 (%)	Q30 以上水平的碱基占比 (%)	过滤后的序列碱基 G + C 占比 (%)
CK1	44 574 822	42 667 158	97.37	92.73	45.88
CK2	43 464 030	41 706 204	97.37	92.65	45.86
CK3	44 964 412	42 593 498	97.13	92.15	46.50
CNTs1	41 717 746	38 841 132	97.24	92.37	45.74
CNTs2	43 111 070	41 704 788	97.20	92.27	45.97
CNTs3	44 311 516	42 744 978	97.26	92.44	46.13

差异表达基因 GO 功能注释了 1 883 个差异显著表达基因,分布在 109 个基因富集 GO 条目。富集 GO 条目分为 3 类,分别为差异表达基因在羧基化碳纳米管处理下的生物过程、细胞成分和分子功能,各类选取富集程度最高的 10 个 GO 条目分析(图 1)。

在生物过程类别,差异表达基因主要集中于细胞壁组成和修饰、蛋白质修饰、硫酸盐和硫化物运输、氧化应激反应等;在细胞成分分类信息中,细胞外成分和细胞合成等显著富集;在分子功能分类中,富集程度最高的是 DNA 合成、酶催化活性和跨膜蛋白活性。

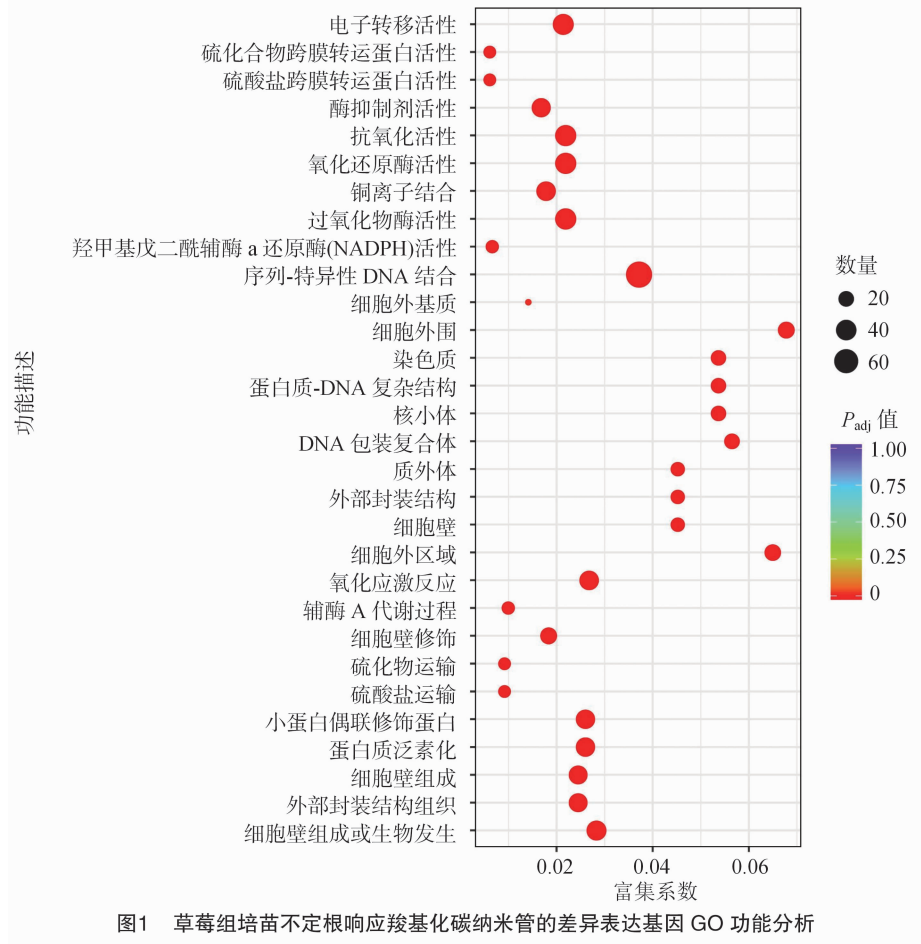


图1 草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管的差异表达基因 GO 功能分析

2.4 差异表达基因 KEGG 信号通路

KEEG 富集分析发现,在羧基化碳纳米管处理下试验组与对照组通路上共有 736 个差异表达基因。由图 2 可知,共有 512 个差异表达基因被注释到了 20 个通路中。其中,富集显著性较高的前 5 条代谢途径分别为类黄酮合成、苯基丙酸合成、ABC

转运蛋白、MAPK 信号通路及苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸合成。苯基丙酸合成代谢途径差异基因数量最多,共 79 个。

2.5 qRT-PCR 验证

为了验证转录组测序结果的可靠性,挑选了 8 个差异基因进行 qRT-PCR 验证。上调的表达基因

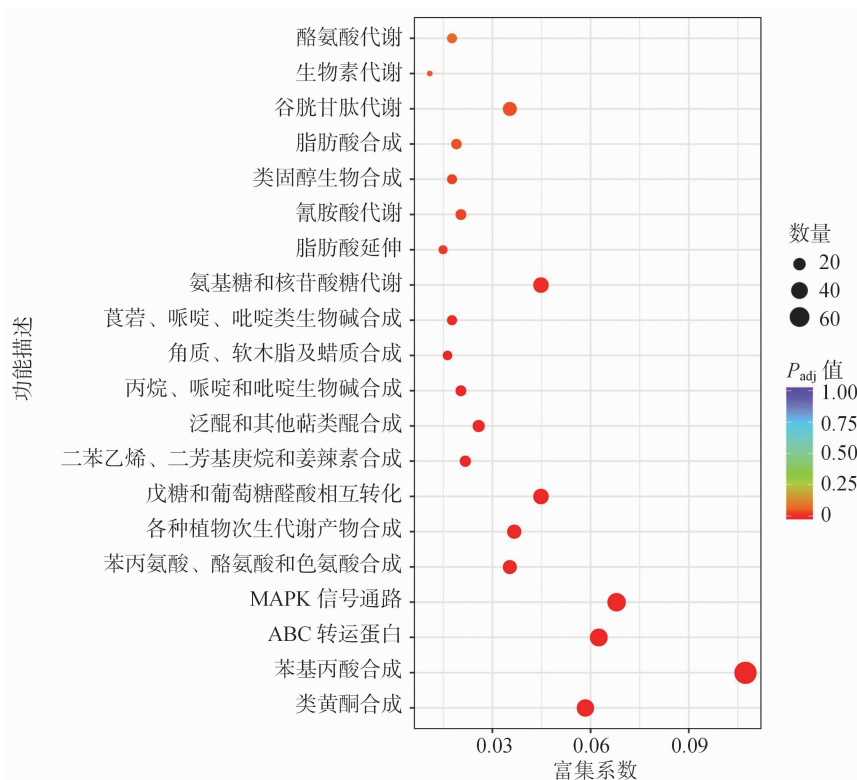


图2 草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管的差异表达基因 KEGG 富集分析

选择 *snap - Fvb1_4_F - processed - gene - 38. 17*、*augustus - Fvb2_4_F - processed - gene - 141. 20*、*maker - Fvb5_1_F - augustus - gene - 23. 36*、*maker - Fvb3_4_F - snap - gene - 43. 30*，下调的差异表达基因选择 *maker - Fvb2_1_F - augustus - gene - 121. 34*、*maker - Fvb4_2_F - augustus - gene - 161. 43*、*augustus - Fvb6_4_F - processed - gene - 226. 12*、*maker - Fvb6_3_F - snap - gene - 8. 40*，内参基因选用 *FvActin*。qRT-PCR 验证结果(图3)与转录组测序结果、定量分析结果一致，只是差异倍数上与转录组的数据有所区别，进一步说明 RNA-Seq 的结果可靠。

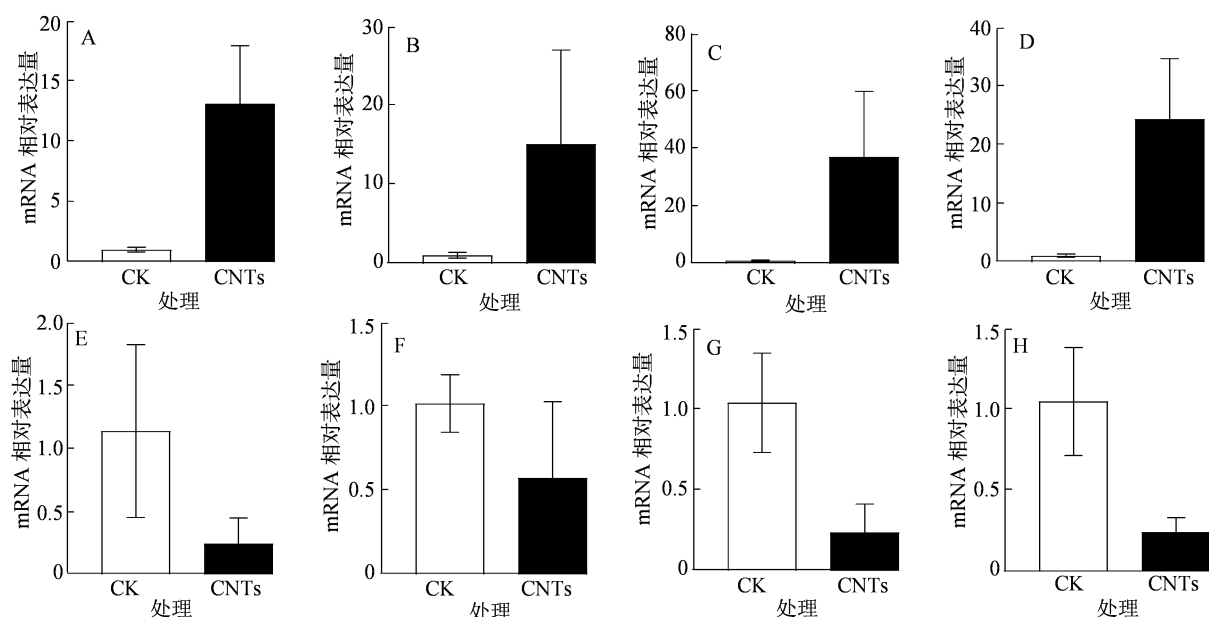
3 讨论

碳纳米管能够进入植物体内调控植物 DNA 和蛋白质的相关代谢途径，影响植物生长发育的许多重要过程^[12]。在实际应用中，根据碳纳米管不同的类型、粒径、浓度和溶解度等，对不同种类植物造成的影响各不相同^[13-15]。研究发现，低浓度的碳纳米管有利于促进种子萌发、根和茎生长以及植物总生物量增长^[16]，而高浓度的碳纳米管不但能够抑制植物生长，还会对植物生长环境造成破坏^[17]。

关于碳纳米管对植物作用的机理研究，李佳慧

在 CNTs 处理对文心兰组培苗影响的研究中，发现添加了 CNTs 的培养基中文心兰的内部或表面产生了 CNTs 团聚状结构，并且影响相关酶活性，表明 CNTs 进入植物后会改变组织结构，影响植物生理生化特性^[18]。在分子机理方面，CNTs 处理植物后能够影响水通道蛋白相关基因表达。Khodakovskaya 等发现，使用多壁碳纳米管处理番茄根系，能够诱导水通道蛋白 *LeAqp2* 基因表达水平上调^[19]。在低浓度碳纳米管处理烟草研究中，Khodakovskaya 等发现，CNTs 能够提高烟草的水通道蛋白 *Nt-PIPI* 基因和烟草细胞分化相关基因 *NtLRX1* 表达水平^[20]。CNTs 作用植物除了影响水通道蛋白相关基因表达之外，还能激活一些抗逆性相关基因，提高植物整体应对逆境胁迫的能力^[21-23]。

但是，在农业生产中使用碳纳米管会不可避免地使其释放到环境中，改性的功能化碳纳米管在进入环境后会引发毒性效应^[17]。目前，关于碳纳米管负面效应的研究主要在动物和微生物方面^[24-27]。此外，碳纳米管具有一定的消毒杀菌作用，采用碳纳米管微波辐射处理能够抑制薄壳山核桃砧木内的木质部难养菌，从而减少细菌性叶枯病发生^[28-29]。对植物而言，CNTs 虽然可以促进种子萌发和植物生长发育，但是也会抑制植物生长、降低植物组织生



A. 上调差异表达基因: *snap-Fvb1_4_F-processed-gene-38.17*; B. 上调差异表达基因: *augustus-Fvb2_4_F-processed-gene-141.20*; C. 上调差异表达基因: *maker-Fvb5_1_F-augustus-gene-23.36*; D. 上调差异表达基因: *maker-Fvb3_4_F-snap-gene-43.30*; E. 下调差异表达基因: *maker-Fvb2_1_F-augustus-gene-121.34*; F. 下调差异表达基因: *maker-Fvb4_2_F-augustus-gene-161.43*; G. 下调差异表达基因: *augustus-Fvb6_4_F-processed-gene-226.12*; H. 下调差异表达基因: *maker-Fvb6_3_F-snap-gene-8.40*

图3 差异表达基因 qRT-PCR 相对表达水平

物量^[30-31]。关于碳纳米管处理复合镉(Cd)对蚕豆幼苗的毒性效应研究,刘玲等发现羧基化多壁碳纳米管高浓度处理会加剧 Cd 对蚕豆幼苗的氧化胁迫^[32]。但是,在多壁碳纳米管对水稻幼苗缓解 1,2,4-三氯苯(TCB)毒性的研究中,发现多壁碳纳米管可以显著缓解 TCB 对水稻幼苗的生理胁迫^[33]。因此,如何有效利用碳纳米材料处理植株,使其产生正面效应将是未来研究的重点方向。

本研究通过转录组水平揭示草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管处理的关键基因,对探索碳纳米材料对植物影响的分子机理研究具有重要意义。本试验中发现,草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管的差异表达基因参与类黄酮积累途径、ABC 转运蛋白合成和细胞壁重塑过程等,有研究表明这些生物过程也在草莓抵御逆境胁迫中发挥重要作用^[34]。例如,ABC 转运蛋白,其广泛存在于植物中,可将各种脂质、植物激素、重金属、羧酸盐、叶绿素分解代谢物和异种生物偶联物等底物进行生物膜上的运输,被认为参与许多植物生理过程,使植物适应生物和非生物胁迫环境^[35]。笔者推测在样品处理阶段,为了使羧基化碳纳米管更好地吸附进入草莓根系,采用了超声细胞破碎处理,也导致了草莓根部细胞受损,而羧基化碳纳米管影响了一些抗逆性相关基因表达,该推论有待试验进一步论证。

4 结论

本研究对红颜草莓脱毒组培苗不定根进行了转录组测序,获得了其响应羧基化碳纳米管的差异表达基因,并对基因进行了功能注释。羧基化碳纳米管处理草莓根系后,引起了细胞壁重塑、蛋白质修饰、硫酸盐运输、氧化应激反应等生物过程及 DNA 合成、酶催化活性、跨膜蛋白活性等分子功能变化,代谢通路方面差异表达基因主要参与类黄酮合成、苯基丙酸合成、ABC 转运蛋白、MAPK 信号通路及苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸合成等。本研究从转录组水平揭示草莓组培苗不定根响应羧基化碳纳米管处理的关键基因,为研发基于碳纳米管的草莓良种繁育新技术提供参考。

参考文献:

- [1] 赵密珍,王 静,袁华招,等. 草莓育种新动态及发展趋势[J]. 植物遗传资源学报,2019,20(2):249-257.
- [2] 于红梅,赵密珍,袁华招,等. 江苏省草莓生产现状调查及经济效益分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(24):345-347.
- [3] 李水根,方献平,张 丽,等. ‘红颜’草莓脱毒苗组培快繁及移栽驯化[J/OL]. 分子植物育种,2022:1-8(2022-06-27)[2024-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220624.1453.006.html>.
- [4] Iijima S, Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter[J]. Nature,1993,363:603-605.

- [5] Choi W, Yang G, Kim S L, et al. One - step synthesis of nitrogen - iron coordinated carbon nanotube catalysts for oxygen reduction reaction[J]. Journal of Power Sources, 2016, 313: 128 - 133.
- [6] Yang G, Tan J, Jin H, et al. Creating effective nanoreactors on carbon nanotubes with mechanochemical treatments for high - areal - capacity sulfur cathodes and lithium anodes [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(32): 1800595.
- [7] Liu Q L, Chen B, Wang Q L, et al. Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells[J]. Nano Letters, 2009, 9(3): 1007 - 1010.
- [8] 曹 凡, 吴 玲, 谷青青, 等. 碳纳米管在植物繁育中的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(3): 28 - 32.
- [9] Zhou Y H, Xiong J S, Shu Z Q, et al. The telomere - to - telomere genome of *Fragaria vesca* reveals the genomic evolution of *Fragaria* and the origin of cultivated octoploid strawberry [J]. Horticulture Research, 2023, 10(4): uhad027.
- [10] Love M I, Huber W, Anders S. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA - seq data with DESeq2 [J]. Genome Biology, 2014, 15(12): 550.
- [11] 余婷婷, 沈淑容, 许以灵, 等. 草莓 YABBY 基因家族的鉴定及表达分析[J]. 生物工程学报, 2024, 40(1): 104 - 121.
- [12] Cañas J E, Long M, Nations S, et al. Effects of functionalized and nonfunctionalized single - walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(9): 1922 - 1931.
- [13] Shen C X, Zhang Q F, Li J, et al. Induction of programmed cell death in *Arabidopsis* and rice by single - wall carbon nanotubes[J]. American Journal of Botany, 2010, 97(10): 1602 - 1609.
- [14] Lin C, Fugetsu B, Su Y B, et al. Studies on toxicity of multi - walled carbon nanotubes on *Arabidopsis* T87 suspension cells[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(2/3): 578 - 583.
- [15] Husen A, Siddiqi K S. Carbon and fullerene nanomaterials in plant system[J]. Journal of Nanobiotechnology, 2014, 12: 16.
- [16] Khodakovskaya M V, Kim B S, Kim J N, et al. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community [J]. Small, 2013, 9(1): 115 - 123.
- [17] Petersen E J, Zhang L W, Mattison N T, et al. Potential release pathways, environmental fate, and ecological risks of carbon nanotubes [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(23): 9837 - 9856.
- [18] 李佳慧. 碳纳米管处理对文心兰类原球茎增殖、分化和无菌苗生长的影响及相关机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 49.
- [19] Khodakovskaya M V, de Silva K, Nedosekin D A, et al. Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle - plant interactions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(3): 1028 - 1033.
- [20] Khodakovskaya M V, de Silva K, Biris A S, et al. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells[J]. ACS Nano, 2012, 6(3): 2128 - 2135.
- [21] Lahiani M H, Dervishi E, Chen J H, et al. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(16): 7965 - 7973.
- [22] Vander Willigen C, Postaire O, Tournaire - Roux C, et al. Expression and inhibition of aquaporins in germinating *Arabidopsis* seeds [J]. Plant & Cell Physiology, 2006, 47(9): 1241 - 1250.
- [23] García - Sánchez S, Bernales I, Cristobal S. Early response to nanoparticles in the *Arabidopsis* transcriptome compromises plant defence and root - hair development through salicylic acid signalling [J]. BMC Genomics, 2015, 16(1): 341.
- [24] Edgington A J, Roberts A P, Taylor L M, et al. The influence of natural organic matter on the toxicity of multiwalled carbon nanotubes [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(11): 2511 - 2518.
- [25] Mouchet F, Landois P, Puech P, et al. Carbon nanotube ecotoxicity in amphibians: assessment of multiwalled carbon nanotubes and comparison with double - walled carbon nanotubes [J]. Nanomedicine, 2010, 5(6): 963 - 974.
- [26] Folkmann J K, Risom L, Jacobsen N R, et al. Oxidatively damaged DNA in rats exposed by oral gavage to C60 fullerenes and single - walled carbon nanotubes [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117(5): 703 - 708.
- [27] Liu S B, Wei L, Hao L, et al. Sharper and faster “nano darts” kill more bacteria: a study of antibacterial activity of individually dispersed pristine single - walled carbon nanotube [J]. ACS Nano, 2009, 3(12): 3891 - 3902.
- [28] Hilton A, Jeong M, Hsu J H, et al. Thermal treatment using microwave irradiation for the phytosanitation of *Xylella fastidiosa* in pecan graftwood [J]. PLoS One, 2021, 16(1): e0244758.
- [29] 曹 凡, 王 莹, 郭 聪, 等. 美国薄壳山核桃细菌性叶枯病研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 18 - 22.
- [30] Begum P, Ikhtari R, Fugetsu B, et al. Phytotoxicity of multi - walled carbon nanotubes assessed by selected plant species in the seedling stage [J]. Applied Surface Science, 2012, 262: 120 - 124.
- [31] Begum P, Ikhtari R, Fugetsu B. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce [J]. Carbon, 2011, 49(12): 3907 - 3919.
- [32] 刘 玲, 许婷婷, 赵薪程, 等. 羧基化多壁碳纳米管与镉复合干扰蚕豆幼苗生理特性的研究[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(6): 252 - 261.
- [33] 赛闹汪青, 曹佳鑫, 庞海龙, 等. 多壁碳纳米管对水稻幼苗的生理学效应及对 1,2,4 - 三氯苯毒性的缓解[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 534 - 542.
- [34] Li S T, Chang L L, Sun R, et al. Combined transcriptomic and metabolomic analysis reveals a role for adenosine triphosphate - binding cassette transporters and cell wall remodeling in response to salt stress in strawberry [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 996765.
- [35] Kretzschmar T, Burla B, Lee Y, et al. Functions of ABC transporters in plants [J]. Essays in Biochemistry, 2011, 50(1): 145 - 160.