

申报 2024 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果公示内容

一、成果名称

黄土高原苹果抗旱分子机制解析与种质创新

二、成果简介

我国是世界上第一大苹果生产国，西北黄土高原产区是我国苹果的最佳产区和最大产区。干旱是限制旱区苹果产业发展的重要环境问题。尤其近年来全球气候变化加剧，灾害天气频繁发生，导致苹果品质、产量受损。据统计，2013 年干旱造成陕西苹果减产 30%。因此，培育和推广抗旱性强的优质苹果品种对于应对全球气候变化具有重要的经济意义。由于苹果童期长、基因组杂合，加之自交不亲和，传统育种方法不仅耗时长，而且耗费大量人力、土地资源，育种效率偏低。分子育种，包括基因工程改造育种与分子标记辅助育种，则克服了种间障碍，并能做到定向改良。因此，开展苹果对干旱的响应研究，阐明苹果抗旱重要基因的功能与作用机制，并解析这些基因的信号调控网络，将为通过分子育种手段培育苹果抗旱新种质提供新基因与理论支持。以苹果抗旱为主要研究内容，围绕苹果抗旱关键基因发掘与鉴定、种质创制等方面开展了系统工作，取得了一系列创新性成果。

1、采用多种策略筛选到苹果抗旱种质及抗旱相关基因，为苹果抗旱育种提供了亲本资源和基因资源。前期通过隶属函数法等对 103 份苹果种质资源分别开展了高通量抗旱评价，筛选到抗旱种质，可作为杂交亲本资源。为挖掘抗旱种质的优异基因资源，通过比较基因组、转录组（mRNA-seq, small RNA-seq）、表观组、全基因组关联分析等手段，从抗旱种质富平楸子、秦冠、新疆野苹果中挖掘到抗旱相关基因，包括两个 MYB 类转录因子 MdMYB88 及 MdMYB124、MdDof54、MdBBX7、MdGH3.6、MdRFNR1、MdSUMO2、MdMTA、miRNAs 等，并解析了富平楸子抗性高的基因来源，同时阐明了其作为砧木能给接穗提供抗性的分子基础（*Plant Cell*, 2022; *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 2021, 2022; *New Phytologist*, 2022）。这些结果为苹果抗旱育种提供了抗逆亲本、基因资源，并为深入研究抗旱种质资源的分子机制提供了遗传信息。

2、解析了苹果抗旱分子机制，建立了抗旱调控网络，为苹果抗旱分子育种奠定了理论基础。苹果抗旱基因功能、作用机制的解析是利用分子育种技术进行抗旱苹果种质创制的关键和核心。在前期抗旱基因资源挖掘的基础上，解析了以 MdMYB88 和 MdMYB124 转录因子为核心的抗旱调控网络。发现 MdMYB88/124 通过调控根系木质部发育（*Plant Physiology*, 2018）、ABA 及 BR 合成、次生代谢物积累等促进苹果抗旱；MdMYB88/124 与 RNA 结合蛋白 MdHYL1 互作，并通过调控干旱相关 miRNAs 的丰度及根系发育促进苹果抗旱（**授权专**

利: ZL202110550698.4)。MdBBX7 是干旱正调控因子, 在干旱下, 随着 MdMIEL1 的降解, MdBBX7 被释放、激活, 从而促进苹果抗旱 (Plant Physiology, 2021)。研究还发现除了泛素化之外还有其他形式的翻译后修饰调控苹果抗旱性, 如 SUMO 化。进一步研究发现 SUMO 化的 MdDREB2A 能被 MdRNF4 泛素化并降解, 打破了以往多数研究中认为的蛋白质 SUMO 化的作用是稳定该蛋白这一认识 (Plant Biotechnology Journal, 2022)。

阐明了表观遗传在苹果抗旱中的机制。首次在苹果中报道 RNA 修饰 (m^6A) 调控苹果抗旱性的分子机制: mRNA 甲基转移酶 MdMTA 在干旱胁迫下能通过调控 mRNA 的 m^6A 水平调控一些 ROS 清除、木质素合成有关的 mRNA 的稳定性、翻译效率, 促进苹果抗旱 (New Phytologist, 2022)。前期筛选到一个干旱诱导型铁氧还蛋白 MdRFNR1, 其可以催化 NADPH 为 $NADP^+$, 生成还原态 Fe, 促进苹果抗旱。MdRFNR1 启动子中存在一个 MITE 转座子插入, 且该 MITE 与 MdRFNR1 在干旱下的诱导表达以及苹果抗氧化酶活性正相关。对 400 多个苹果属植物分析表明, 该 MITE 可开发为苹果抗旱分子标记 (Plant Cell, 2022)。

3、开发了苹果抗旱的分子标记, 研发了抗旱调控技术, 并创制了抗旱新种质。分子育种, 包括分子标记辅助育种与转基因育种, 是传统杂交育种的重要补充。除了获得抗旱新种质, 采用抗旱调控技术也是提高苹果抗旱性的重要途径。前期在 400 多个苹果属植物中的分析表明, MdRFNR1 启动子上的 MITE 转座子可作为苹果抗旱的分子标记 (Plant Cell, 2022)。

除分子标记辅助育种, 转基因技术也是分子育种的重要手段。前期通过转基因技术获得大量抗旱的苹果新种质 (Plant Cell, 2022; Plant Biotechnology Journal, 2018, 2021, 2022; New Phytologist, 2022)。如将 MdGH3.6 及其同源基因敲低后, 转基因植株更抗旱。用转基因植株做砧木, 嫁接富士, 相比于 T337, 转基因植株做砧木更能提高接穗抗旱性及水分利用效率, 且接穗开花、座果、果实品质均不受影响, 表明其有直接作为砧木的价值。

将抗旱砧木新疆野苹果与不抗旱砧木 T337 进行代谢组分析, 发现新疆野苹果在干旱下特异富集化合物 4-MU (4-甲基伞形酮)。适当浓度的 4-MU 可显著提高 T337 的抗旱性, 并能提高其水分利用效率 (授权专利: ZL202111466082.5)。另外, 发现外源施加适当浓度的 GABA, 可提高 T337 的抗旱性及水分利用效率。适当浓度的外源 BR 也可以提高苹果的抗旱性。另外, 发现陕西渭北地区果实生长前期轻度亏缺灌溉 (50%田持) 和生长中期充分灌溉 (75%田持) 可提高苹果水分利用效率及产量与品质 (《果树优质丰产的生理基础与调控技术》)。

三、代表性论文专著或知识产权（标准规范等）,总数不超过 10 项，其中代表性论文专著不超过 8 篇（部）

论文：

1. Niu Chundong, Jiang L, Cao F, Liu C, Guo J, Zhang Z, Yue Q, Hou N, Liu Z, Li X, Tahir M M, He J, Li Z, Li C, Ma F, Guan Q. 2022. Methylation of a MITE insertion in the MdRFNR1-1 promoter is positively associated with its allelic expression in apple in response to drought Stress. **The Plant Cell**, 34(10): 3983~4006（评论文章）
2. Hou N, Li C, He J, Liu Y, Yu S, Malnoy M, Mobeen Tahir M, Xu L, Ma F, Guan Q. 2022. MdMTA-mediated m6A modification enhances drought tolerance by promoting mRNA stability and translation efficiency of genes involved in lignin deposition and oxidative Stress. **New Phytologist**, 234(4): 1294~1314（高被引）
3. Li X, Zhou S, Liu Z, Lu L, Dang H, Li H, Chu B, Chen P, Ma Z, Zhao S, Li Z, van Nocker S, Ma F, Guan Q. 2022. Fine-tuning of SUMOylation modulates drought tolerance of Apple. *Plant Biotechnology Journal*, 20(5): 903~919（封面文章）
4. Chen P, Zhi F, Li X, Shen W, Yan M, He J, Bao C, Fan T, Zhou S, Ma F, Guan Q. 2022. Zinc-finger protein MdBBX7/MdCOL9, a target of MdMIEL1 E3 ligase, confers drought tolerance in Apple. *Plant Physiology*, 188(1): 540~559（评论文章）
5. Chen P, Li Z, Zhang D, Shen W, Xie Y, Zhang J, Jiang L, Li X, Shen X, Geng D, Wang L, Niu C, Bao C, Yan M, Li H, Li C, Yan Y, Zou Y, Micheletti D, Koot E, Ma F, Guan Q. 2021. Insights into the effect of human civilization on *Malus* evolution and Domestication. *Plant Biotechnology Journal*, 19(11): 2206~2220（封面文章）
6. Xu J, Zhou S, Gong X, Song Y, van Nocker S, Ma F, Guan Q. 2018. Single-base methylome analysis reveals dynamic epigenomic differences associated with water deficit in Apple. *Plant Biotechnology Journal*, 16(2): 672~687（高被引）
7. Geng D, Chen P, Shen X, Zhang Y, Li X, Jiang L, Xie Y, Niu C, Zhang J, Huang X, Ma F, Guan Q. 2018. MdMYB88 and MdMYB124 enhance drought tolerance by modulating root vessels and cell walls in Apple. *Plant Physiology*, 178(7): 1296~1309（高被引）

著作：

《果树优质丰产的生理基础与调控技术》，主编：杨洪强，房经贵，胡春根，管清美（按照形式笔画排序）。2022 年 11 月出版，西北农林科技大学出版社。ISBN:978-7-5683-1170-0

专利：

管清美, 申小霞, 毛秀山, 平怡坤, 李雪薇, 樊天乐, 张子桐. 促进砧木根系发育及抗旱的可移动 miRNA 及鉴定方法. 授权时间：2022 年 7 月 29 日. 专利号：ZL202110550698.4

管清美, 张德辉, 程鹏达, 张雨田, 赵爽. 4-甲基伞形酮在提高植物抗干旱上的用途. 授权时间：2022 年 11 月 01 日. 专利号：ZL202111466082.5

四、主要完成人情况

姓名	排名	行政/技术职称	工作单位/完成单位
管清美	1	院长/教授	西北农林科技大学/西北农林科技大学
牛春东	2	无/副教授	西北农林科技大学/西北农林科技大学
李雪薇	3	无/副教授	西北农林科技大学/西北农林科技大学
谢银鹏	4	无/教授	西北农林科技大学/西北农林科技大学
徐记迪	5	无/副教授	西北农林科技大学/西北农林科技大学
张德辉	6	无/讲师	山西农业大学/山西农业大学
李中兴	7	无/助理研究员	西北农林科技大学/西北农林科技大学
包查娜	8	无/助理研究员	西北农林科技大学/西北农林科技大学
申小霞	9	无/副教授	西北农林科技大学/西北农林科技大学
褚广东	10	无/农艺师	淳化天地生态农业科技有限公司/淳化天地生态农业科技有限公司
李文强	11	无/农艺师	乾县强盛果业有限公司/乾县强盛果业有限公司

五、主要完成单位

单位名称	排名
西北农林科技大学	1
山西农业大学	2
淳化天地生态农业科技有限公司	3
乾县强盛果业有限公司	4

六、完成人合作关系情况

完成人合作关系情况表					
序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文专著	牛春东/1; 李雪薇/10; 李中兴/13; 管清美/16	2022 年	论文 1	文章首页
2	论文专著	李中兴/2; 谢银鹏/5; 李雪薇/8; 申小霞/9; 牛春东/12; 包查娜 /13, 管清美/22	2021 年	论文 2	文章首页
3	论文专著	李雪薇/1; 李中兴/11; 管清美/14	2022 年	论文 4	文章首页
4	论文专著	徐记迪/1; 管清美 7	2018 年	论文 5	文章首页
5	论文专著	李雪薇/3; 包查娜/7; 管清美 11	2022 年	论文 6	文章首页
6	论文专著	申小霞/3; 李雪薇/5; 谢银鹏/7; 牛春东/8; 管清美/12	2018 年	论文 7	文章首页
7	专利	管清美/1; 申小霞/2; 李雪薇/5	2022 年	专利 1	专利授权证书
8	专利	管清美/1; 张德辉/2	2022 年	专利 2	专利授权证书
9	试验站建设	管清美/1; 褚广东/2	2022 年	苹果新种质抗旱性 评价	苹果新种质抗旱性 评价
10	论文专著	李文强/5; 管清美/6	2022 年	论文(陕西渭北地区 不同时期控水对苹果 产量、品质和水分 利用效率的影响)	文章首页