

# 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

小麦抗旱性的分子遗传基础与新种质创制

## 二、成果简介

干旱、半干旱地区小麦种植面积占我国小麦总面积的 60%以上，干旱缺水始终是制约我国旱区小麦生产的主要非生物逆境因子。由于全球气候变暖引发干旱发生的周期越来越短，程度日趋严重，对粮食生产构成了严重威胁。未来农业生产必须在高度变化的气候中实现粮食的稳步增产以满足人口不断增长的需求，提高农作物抗旱性已经成为我国乃至全球农业生产的迫切需要。但是，植物抗旱性是由多基因控制的复杂数量性状，从农作物中寻找并克隆关键抗旱基因，并将其应用到作物抗旱分子设计育种中，已逐渐成为改良作物抗旱性的重要途径。因此，克隆一批具有自主知识产权的小麦抗旱基因，发掘一批能在生产实践中应用的抗旱优异等位基因和基因模块，高效、智能化利用抗旱基因群进行小麦抗逆改良，对于保障我国粮食安全，推进旱区农业科技现代化建设具有重要意义。鉴于此，本项目在国家重点研发计划、国家自然科学基金、陕西省杰出青年科学基金等项目资助下，聚焦小麦抗旱性的分子遗传基础，从“资源挖掘-机理揭示-种质创新”三个层面开展系统研究，取得系列创新性研究成果，为提出新的育种策略和培育抗旱小麦新品种提供重要的基因资源和技术保障。

**创新点 1：克隆获得小麦关键抗旱数量性状基因 *TaDTG6-B*、*TaNAC071-A* 及 *TaSNAC8-6A*，揭示了其调控小麦抗旱性的分子遗传机理，为小麦抗旱遗传改良提供了重要的基因资源、理论依据和技术支撑。**小麦抗旱性是由多基因控制的复杂数量性状，为了解析小麦抗旱性的遗传基础，发掘优异抗旱基因，以干旱胁迫下的苗期存活率为突破口，通过全基因组关联分析挖掘了小麦抗旱遗传位点，分离克隆到控制小麦抗旱性的重要数量性状基因 *TaDTG6-B*、*TaNAC071-A* 及 *TaSNAC8-6A*。在此基础上，从小麦抗旱种质资源中发现了功能获得性优异等位基因 *TaDTG6-B*<sup>Del574</sup>，解析了其编码蛋白结合并激活胁迫应答基因表达，增强小麦抗旱性的分子遗传机制；发掘了 *TaNAC071-A*<sup>In-693</sup> 及 *TaSNAC8-6A*<sup>In-313</sup> 抗旱优异等位变异，揭示了其通过调控基因表达影响小麦抗旱性的分子遗传机理。

**创新点 2：**挖掘获得一系列小麦干旱胁迫响应基因，解析了其通过 ABA 信号、脯氨酸合成等途径调控小麦抗旱性的分子机制，为小麦抗旱遗传改良提供了重要的理论依据。鉴定了小麦 *AREB/ABF*、*NAC*、*HD-ZIP*、*TPP* 及 *Di19* 基因家族成员，发掘了一系列受干旱胁迫诱导的候选基因。在此基础上，克隆了受 TaABFs 反馈调控的 ABA 受体基因 *TaPYL1-1B*，揭示了 *TaPYL1-1B* 通过调控气孔开度提高水分利用效率，进而增强小麦抗旱性的作用机制，明确了缺水条件下 ABA 受体基因的过表达可作为提高作物水分利用效率和生产力的一种有效策略；进一步发掘了受 TaABF2 调控的小麦干旱胁迫应答基因 *TaERF87*，解析了 TaABF2-TaERF87/TaAKS1-TaP5CS1/TaP5CR1 分子网络调控脯氨酸合成并增强小麦抗旱性的分子机理；此外，申请人近年来还挖掘了己糖激酶基因 *TaHKK3-2A*，明确了其调控小麦叶片气孔密度和抗旱性的生物学功能。

**创新点 3：**基于小麦抗旱分子遗传基础解析，创制了抗旱小麦新材料，为小麦抗旱遗传改良提供了新思路。利用已明确的重要抗旱基因结合转基因技术，创制了具有育种利用价值的 *TaNAC071-A* 高代稳定过表达株系 6 份，田间表现出明显的抗性，具有良好的应用潜力。另外，开发了不依赖于基因型的高效转基因技术，将 *TaNAC071-A*、*TaDTG6-B*、*TaERF87* 等重要抗旱基因转入我国高产、优质主栽品种济麦 22、西农 979、西农 511、小偃 22、百农 207 等，为通过生物育种改良小麦抗旱性奠定了良好的基础。此外，基于开发的分子标记，通过标记辅助选择将抗旱优异等位基因 *TaNAC071-A*<sup>In-693</sup> 及 *TaDTG6-B*<sup>Del574</sup> 导入西农 2208、西农 20 等栽培品种，创制了高代（F5、F6）优异等位基因渗入系 20 份，为小麦抗旱遗传改良提供了技术支撑和实践方案。

项目成果在 *Molecular Plant*、*Plant Cell*、*New Phytologist*、*Plant Biotechnology Journal*、*Plant, Cell & Environment* 等国际植物科学领域主流期刊发表论文 15 篇以上，他引 350 次以上。此外，授权国际发明专利 1 项、国家发明专利 5 项，为小麦抗旱遗传改良提供了具有自主知识产权的基因和标记专利。研究成果得到国内外同行的广泛认可，发表在 *Molecular Plant* 上的论文被推荐为当期封面文章，被世界学术组织 **F1000 Prime** 重点推荐，并被评为 **ESI1%高被引论文和热点论文**。此外，*Molecular Plant* 同期在线发表了来自澳大利亚国立大学、澳大利亚昆士兰大学的数位权威专家撰写的评论文章，对该成果进行了评论与展望，评论指出该

研究是小麦抗旱研究领域的重要进展,并强调了利用基因组非编码调控区的遗传变异改良作物性状的重要性。基于该工作的影响力, 被遴选为**第八届中国科协优秀科技论文**(2023 年), 遴选原则为应具有重要创新价值、能够开拓和引领学科发展(基础研究论文), 且每个学科集群不超过 10 篇基础研究论文(遴选范围是 2019 年 1 月 1 日以来发表在我国科技期刊上的优秀论文)。

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)

[1] **Mao H**, Li S, Chen B, Jian C, Mei F, Zhang Y, Li F, Chen N, Li T, Du L, Ding L, Wang Z, Cheng X, Wang X, Kang Z. Variation in *cis*-regulation of a NAC transcription factor contributes to drought tolerance in wheat. *Molecular Plant*, 2022, 15(2):276-292.

[2] Mei F, Chen B, Du L, Li S, Zhu D, Chen N, Zhang Y, Li F, Wang Z, Cheng X, Ding L, Kang Z, **Mao H**. A gain-of-function allele of a DREB transcription factor gene ameliorates drought tolerance in wheat. *Plant Cell*, 2022, 34(11):4472-4494.

[3] Du L, Huang X, Ding L, Wang Z, Tang D, Chen B, Ao L, Liu Y, Kang Z, **Mao H**. TaERF87 and TaAKS1 synergistically regulate TaP5CS1/TaP5CR1-mediated proline biosynthesis to enhance drought tolerance in wheat. *New Phytologist*, 2022, 237(1):232-250.

[4] **Mao H**, Jian C, Cheng X, Chen B, Mei F, Li F, Zhang Y, Li S, Du L, Li T, Hao C, Wang X, Zhang X, Kang Z. The wheat ABA receptor gene *TaPYL1-1B* contributes to drought tolerance and grain yield by increasing water-use efficiency. *Plant Biotechnology Journal*, 2022, 20(5):846-861.

[5] Li S, Yu S, Zhang Y, Zhu D, Li F, Chen B, Mei F, Du L, Ding L, Chen L, Song J, Kang Z, **Mao H**. Genome-wide association study revealed *TaHXX3-2A* as a candidate gene controlling stomatal index in wheat seedlings. *Plant Cell & Environment*, 2022, 45(8):2306-2323.

[6] **Mao H**, Li S, Wang Z, Cheng X, Li F, Mei F, Chen N, Kang Z. Regulatory changes in *TaSNAC8-6A* are associated with drought tolerance in wheat seedlings. *Plant Biotechnology Journal*, 2020, 18(4):1078-1092.

[7] 毛虎德, 康振生, 黄雪玲. 植物抗旱相关蛋白 TaNAC15 及其编码基因与应用, 发明专利, 2022, ZL 2020 1 0047032.2

[8] 毛虎德, 康振生, 黄雪玲. 蛋白质 TaPYL1 及其编码基因与应用, 发明

专利，2023，ZL 2021 1 1073339.0

[9] 毛虎德，康振生，梅方明. TaDTG6 蛋白在提高植物抗旱性中的应用，发明专利，2023，ZL 2022 1 0213905.1

[10] 毛虎德，康振生，梅方明. 小麦 *TaDTG6* 基因与抗旱性相关的单体型及其分子标记和应用，2023，ZL 2022 1 0623673.7

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 |
|-----|----|---------|-----------|
| 毛虎德 | 1  | 研究员     | 西北农林科技大学  |
| 康振生 | 2  | 教授      | 西北农林科技大学  |
| 李淑敏 | 3  | 无       | 西北农林科技大学  |
| 杜琳颖 | 4  | 无       | 西北农林科技大学  |
| 陈斌  | 5  | 无       | 西北农林科技大学  |
| 黄雪玲 | 6  | 正高级实验师  | 西北农林科技大学  |
| 王晓静 | 7  | 教授      | 西北农林科技大学  |
| 李方方 | 8  | 无       | 西北农林科技大学  |

五、主要完成单位

| 单位名称     | 排名 |
|----------|----|
| 西北农林科技大学 | 1  |
|          |    |
|          |    |
|          |    |
|          |    |

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          | 论文合著 | 康振生/15   | 2016 年 9 月 | Variation in cis-regulation of a NAC transcription factor contributes to drought tolerance in |      |

|   |            |        |            |   |  |
|---|------------|--------|------------|---|--|
|   |            |        |            | wheat   |  |
| 2 | 论文合著       | 李淑敏/1  | 2017 年 9 月 | Genome-wide association study revealed TaHXK3-2A as a candidate gene controlling stomatal index in wheat seedlings              |  |
| 3 | 论文合著       | 杜琳颖/1  | 2018 年 1 月 | TaERF87 and TaAKS1 synergistically regulate TaP5CS1/TaP5CR1-mediated proline biosynthesis to enhance drought tolerance in wheat |  |
| 4 | 论文合著       | 陈斌/2   | 2018 年 9 月 | A gain-of-function allele of a DREB transcription factor gene ameliorates drought tolerance in wheat                            |  |
| 5 | 共同知识<br>产权 | 黄雪玲/3  | 2016 年 9 月 | 植物抗旱相关蛋白 TaNAC15 及其编码基因与应用  |  |
| 6 | 论文合著       | 王晓静/14 | 2018 年 9 月 | Variation in cis-regulation of a NAC transcription factor contributes to drought tolerance in wheat                             |  |
| 7 | 论文合著       | 李方方/7  | 2018 年 9 月 | Variation in cis-regulation of a NAC transcription factor contributes to drought tolerance in wheat                             |  |