

沈群教授主持“谷子的发展与营养”特约专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.04.010

程汝宏, 张婷, 王根平, 等. 新中国成立以来谷子育种的主要研究进展[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(4): 68-75.

CHENG R H, ZHANG T, WANG G P, et al. The progress of foxtail millet breeding in China[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(4): 68-75.

新中国成立以来谷子育种的主要研究进展

程汝宏, 张婷, 王根平, 罗焱杰

(河北省农林科学院 谷子研究所, 国家谷子改良中心, 河北省杂粮研究实验室,
河北 石家庄 050035)

摘要: 了解谷子育种研究发展, 对指导谷子育种和研究具有重要参考意义。综述了我国谷子育种发展的几个阶段以及各阶段育种目标和代表性品种。新中国建立后到新世纪之前的谷子育种目标大致可分为2个阶段: 高产育种阶段(1950—1985年)和高产多抗兼顾优质阶段(1986—2000年)。2001年之后的新世纪以来, 我国谷子育种目标和育种手段发生了重大变化, 大致分为3个阶段: (1) 2001—2008年的第一阶段突破了优质与高产的矛盾, 育成了一级优质的冀谷19、长农35号, 在区域试验中产量较高产对照增产10%以上; 育成了第一个抗烯禾啶除草剂杂交种张杂谷3号、第一个抗烯禾啶除草剂多系品种冀谷25。(2) 2009—2018年的第二阶段突破了光温敏感限制, 育成了在4个生态区均能应用的优质广适品种豫谷18; 区域试验参试品种50%抗除草剂, 并育成冀谷39、金苗K1、张杂谷13等聚合优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产等优良性状的突破性品种; 育成抗咪唑乙烟酸、抗烟嘧磺隆的新型抗除草剂品种, 高谷蛋白品种、高抗性淀粉品种等专用品种。(3) 2018年之后的第三阶段区域试验中抗除草剂品种占89%, 育成了抗嘧草硫醚新型除草剂品种; 同时抗除草剂品种得到广泛应用, 全国年推广面积前5位的谷子品种有4个为抗除草剂类型; 生物育种取得初步进展, 建立了谷子高效遗传转化体系, 分子标记辅助育成高油酸品种, 基因编辑创制出单倍体诱导系等新材料。

关键词: 谷子育种; 育种进展; 育种目标; 品种; 高产; 抗除草剂; 生物育种

中图分类号: TS213; S-1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2022)04-0068-08

网络首发时间: 2022-06-29 17:35:07

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220629.0959.002.html>

收稿日期: 2022-04-13

基金项目: 国家重点研发专项(2019YFD1001700); 河北省重点研发计划(19226378D); 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-06-14.5-A5); 河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZX-GZS-1); 河北现代种业科技创新团队(21326302D)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2019YFD1001700); Key Research and Development Plan of Hebei Province (No. 19226378D); National Modern Agricultural Industry Technology System Special Project (No. CARS-06-14.5-A5); HAAFS Agriculture Science and Technology Innovation Project (No. 2022KJCXZX-GZS-1); Hebei Modern Seed Industry Innovation Team (No. 21326302D)

作者简介: 程汝宏, 男, 1963年出生, 硕士, 研究员, 研究方向为谷子遗传育种与轻简化栽培。E-mail: rhcheng63@126.com. 作者详细介绍见PC10.

The Progress of Foxtail Millet Breeding in China

CHENG Ru-hong, ZHANG Ting, WANG Gen-ping, LUO Yan-jie

(Institute of Millet Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences/National Millet Improvement Center /Key Laboratory of Minor Cereal Crops of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei, 050035, China)

Abstract: Understanding the breeding and research history of Foxtail millet has important significance for guiding future breeding and research. In this paper, several Foxtail millet breeding development stages in our country as well as the breeding targets and representative varieties of each stage are reviewed. From the founding of People's Republic of China to new century, the goals of Foxtail millet breeding can be roughly divided into two stages: high-yield breeding stage (1950-1985) and high-yield, multi-resistance and high-quality stage (1986-2000). In the new century since 2001, the millet breeding goals and breeding methods have undergone major changes, which can be roughly divided into three stages. The first stage is from 2001 to 2008, which broke through the contradiction between high quality and high yield. A series of representative varieties were bred at this stage, including first class high quality Jigu 19 and Changnong 35 whose yield in the regional test increased by more than 10% compared to the control, the first sethoxydim herbicide-resistant hybrid variety Zhangzagu No. 3, and the first sethoxydim herbicide-resistant multi-line variety Jigu 25. The second stage is from 2009 to 2018, which broke through the limitation of light and temperature sensitivity. The high quality and widely suitable variety Yugu 18 was bred, which can be used in 4 ecological regions. 50% of the tested varieties in the regional test at this stage were resistant to herbicide. The representative varieties such as Jigu 39, Jinmiao K1, and Zhangzagu 13 have high quality, broad adaptability, herbicide-resistance, and suitability for mechanized production. Some new varieties, such as herbicide-resistant varieties with resistance to imazethapyr and nicosulfuron, high glutenin varieties, and high resistant starch varieties, were bred at this stage. The third stage is after 2018. The herbicide-resistant varieties in the regional test increased to 89%. They were widely used, and 4 of Top 5 largest planting area varieties in the country were herbicide-resistant. The new herbicide-resistant varieties resistant to sulfamethoxazole were bred. Preliminary progress has been made in biological breeding at this stage. A high-efficiency genetic transformation system of millet has been established, high-oleic acid varieties have been bred with molecular markers, and new materials such as haploid inducible lines have been created by genome editing.

Key words: foxtail millet breeding; breeding progress; breeding objective; variety; high-yield; herbicide-resistant; biological breeding

谷子(foxtail millet),古称“粟”,学名:*Setaria italica*(L.)Beauv,是由狗尾草驯化而来的一个二倍体栽培种($2n=2x=18$),为禾本科黍族狗尾草属,一年生自花授粉草本植物,有少量的异交,平均异交率0.69%^[1]。

谷子起源于我国,已有8700年以上的栽培史^[2]。谷子生产主要分布在中国和印度,其中中国占80%,印度占10%左右,韩国、朝鲜、俄罗斯、尼泊尔、澳大利亚、巴基斯坦、日本、法国、美国等也有少量种植^[3-4]。谷子在中国分布比较广泛,北自黑龙江,南至海南岛,西起新疆、西藏,

东至台湾均有种植。据统计,1952年全国谷子面积987万 hm^2 ,仅次于水稻、小麦、玉米,居第4位。从20世纪70年代开始,谷子的种植面积迅速下降,到1985年全国谷子播种面积减至不足333万 hm^2 ,2000年减至不足133万 hm^2 。面积下滑主要是三方面的原因,一是改革开放后经济快速发展,玉米、小麦、棉花等作物面积增加显著;二是青壮劳动力务工经商,农村劳动力紧缺,谷子不抗除草剂又缺乏生产机械,管理费工耗时,被逐步放弃;三是随着人们生活水平的提高,小米的消费也逐渐由原来的主食和粥食变成以粥食

为主的方式,消费量显著减少。2001 年以来,谷子面积逐步稳定,目前全国谷子种植面积 80 万 hm^2 ,种植面积较大的 15 个省区依次是山西、内蒙古、河北、陕西、辽宁、河南、山东、吉林、黑龙江、甘肃、宁夏、安徽、广西、贵州和新疆,占全国谷子面积 99.8%,其中山西、内蒙古、河北三省区占 2/3 以上。

新世纪以来,特别是 2008 年国家谷子产业技术体系成立以来,谷子育种研究取得长足进展,主要体现在育种方法不断更新、新品种株高显著降低、抗除草剂育种取得突破,机械化轻简化生产得以实现,在种植面积基本稳定的情况下,到 2020 年,单产较 2008 年提高 91%,总产增加 82%,综合机械化率由 2008 年的 8% 提高到 2020 年的 49%,科技进步贡献率提高 33.76 个百分点^[5]。

1 新世纪之前的谷子育种简要回顾

1950—2000 年,我国谷子育种目标大致可分为 2 个阶段:高产育种阶段和高产、多抗兼顾优质阶段^[6]。

1.1 高产育种阶段 (1950—1985 年)

1950—1985 年,由于粮食短缺,谷子育种的主要目标是高产,代表品种有跃进 4 号、昭谷 1 号^[10]、豫谷 1 号^[11]等,特别是 1981 年育成的豫谷 1 号,该品种使我国谷子产量登上了一个新台阶,小面积单产突破了 $550 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$,且抗倒伏、抗旱耐瘠,适应性广泛,年推广面积曾达 40 万 hm^2 ,在适宜范围内覆盖率达 70% 以上。由于这些品种的推广应用,全国的谷子平均单产由 1949 年的 $56.5 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$,提高到 1985 年的 $120 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$,增产幅度达 112%^[6]。在此阶段,育种手段主要是系统育种、杂交育种、诱变育种,1950S 后期至 1970S 中期多数品种采用系统法育成;1959 年,河南省新乡地区农科所张履鹏等在上首先采用杂交方法育成了谷子新品种“新农冬 2 号”;1963 年,张家口地区坝下农科所用 $60\text{Co } \gamma$ 射线照射农家品种“红石柱”干种子,从中选育出新品种“张农 10 号”^[12],这是我国也是世界上第一个诱变育成的谷子品种。

1.2 高产、多抗兼顾优质阶段 (1986—2000 年)

1986—2000 年,谷子育种的目标是高产、多抗兼顾优质。这个阶段的初期,由于豫谷 1 号的

抗谷锈病能力丧失,谷子锈病在谷子主产区特别是华北夏谷区严重流行,导致谷子产量水平大幅度下滑,年际间起伏很大^[13]。为此,谷子育种目标主要是培育抗病高产品种,并先后育成和推广了豫谷 2 号^[14]、冀谷 14 号^[15]等一批抗病高产品种,到 1992 年,谷锈病流行得到有效控制,新品种的抗倒伏能力也大幅度提高,产量水平随之明显上升,到 1996 年,全国谷子平均单产达到 $157.3 \text{ kg}/667 \text{ m}^2$,较 1985 年提高了 31.1%^[6]。随着粮食紧缺状况的缓解,人们对小米的品质提出了新的要求,使得优质育种逐步得到重视,“七五”和“八五”期间开展了优质专用品种选育工作,并育成了一批优质专用新品种,如“冀特 2 号”^[16]、“晋谷 21 号”^[17]等优质米用类型,“冀特 1 号”^[18]等高蛋白、高维生素加工专用类型。1986—1994 年召开了三届全国性的“优质食用粟品质鉴评会”。但这个阶段生产上仍以高产品种为主,优质品种多数存在着产量水平偏低或抗性差等问题。在此阶段,主要育种手段是杂交育种,其次是辐射诱变。

在此阶段,还开展了谷子杂种优势利用。1967 年延安地区农科所从宣化竹叶青品种中首先发现了谷子不育株;1968 年中国科学院遗传研究所用化学诱变的方法育成水里混雄性不育株;1969 年,河北省张家口市坝下农科所崔文生等发现了雄性不育株,1973 年冬育成了不育率 100%、不育度 95% 的高度雄性不育系“蒜系 28”、“黄系 4”,其不育性受一对隐性主效基因控制,一般可育材料均是其恢复系^[19-21]。由于修饰基因的作用,不育株有 5% 左右的自交结实率,产生的种子仍为雄性不育,因此省去了保持系。之后,一些科研单位从品种间杂交和理化处理中又育成了 1066A 等 10 多个隐性核高度雄性不育系^[21]。1996—2000 年龙杂谷 1 号^[22]、冀谷 16 号^[23]、张杂谷 1 号^[24]等两系杂交种先后通过省级审定。但是,由于不育系自身具有 5% 左右的自交结实能力,自交后代仍不育,而且每个谷穗有 3 000 个以上的小花,且发育不一致,使得制种时只有一部分小花能够异交结实,杂种率只有 30 左右%,生产应用需要农民区分不育系和杂交种,成为困扰杂交谷子发展的一大难题导致杂交种未能大面积应用。

2 新世纪我国谷子育种的主要进展

2001年以来,我国谷子育种目标和育种手段发生了重大变化,而且变化逐步加快,大致分为优质高产并重、抗除草剂育种和杂交种起步;优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产阶段;优质广适抗除草剂育种进一步突破、生物育种起步3个阶段^[2,6,7,9,11]。

2.1 优质高产并重、抗除草剂育种和杂交种起步阶段(2001—2008)

2001—2008年,随着我国告别了粮食短缺,优质农产品成为市场的热点,谷子育种目标随之转变为优质、高产并重。在优质育种方面,2001年育成了与高产对照产量持平的“小香米”^[25],2004年河北育成在国家区试中较高产对照豫谷5号增产13.24%的“冀谷19”^[26],在全国第五届优质食用粟品质鉴评会上,荣获一级优质米称号;山西育成在省区试和国家区试中较对照分别增产11.2%和10.98%的“长农35号”^[27],2004年通过山西省认定,2005年通过全国农业技术推广服务中心组织的品种鉴定,在全国第四届优质食用粟品质鉴评会上,荣获一级优质米称号。冀谷19、长农35的育成,突破了优质与高产的矛盾,成为主栽品种和优质小米开发主导品种,冀谷19年最大推广面积5.2万 hm^2 ,居当时全国谷子良种面积第二位,长农35年最大推广面积3.3万 hm^2 。2007年冀谷19、长农35成为国家谷子新品种区域试验华北夏谷组和西北春谷中晚熟组对照品种。

在抗除草剂育种、杂交种选育方面取得突破性进展,6个抗除草剂品种和杂交种通过鉴定,并首次实现了大面积应用。

谷子是小粒半密植性作物,千粒重仅3.0g左右,每千克种子多达30~35万粒,而适宜的留苗密度不足5.0万株/667 m^2 ,考虑种子发芽率、出苗率、保苗率的因素,用种量仅为250g/667 m^2 左右。由于缺乏精量播种机械而且多种植在旱薄地,管理粗放,墒情难以保证,精量播种很难一播保全苗,因此,谷子精量播种技术一直难以推广,农民种谷子一直采用大播种量(1.0~1.5kg/667 m^2)保证全苗、再通过人工间苗达到适宜留苗密度的栽培方式;同时,普通谷子品种缺乏适

宜的除草剂,谷田除草一直靠人工作业。人工间苗、除草不仅是繁重的体力劳动,而且苗期一旦遇到连续阴雨天气,极易造成苗荒和草荒导致严重减产甚至绝收,常年因此减产30%左右,这是谷子种植面积下滑的重要原因^[6,28-30]。

1981年以来,法国、加拿大先后在谷子的近缘种野生青狗尾草群体中发现了受细胞质基因控制的抗阿特拉津(Atrazine)材料和受核显性单基因控制的抗烯禾啶(Sethoxydime)的突变体^[6,31-33];2002年,加拿大又发现了抗咪唑啉酮(Imidazolidinone)、抗烟嘧磺隆(Nicosulfuron)、抗嘧草硫醚(Pyriithiobac-sodium)的青狗尾草突变材料^[6,34]。1993年和2006年,河北省农林科学院谷子研究所的王天宇、程汝宏先后将上述抗除草剂狗尾草材料引入我国,通过非转基因的远缘杂交手段,在世界上首创了5种除草剂谷子新种质以及兼抗2~3种除草剂的多抗材料,开创了我国谷子抗除草剂育种^[6,28,35-37]。但是,单一的抗除草剂品种仍不能解决谷子人工间苗的难题。

2004年河北省农林科学院谷子研究所程汝宏等,在国内外首次提出了“简化栽培谷子育种技术体系及配套栽培方法”,并于2006年获得了国家发明专利^[29]。该方法的核心是综合应用育种和栽培手段,培育抗、不抗或抗不同抗除草剂的谷子新品种的同型姊妹系或近等基因系,并将抗、不抗或抗不同抗除草剂的谷子新品种的同型姊妹系或近等基因系按一定比例混配,创制出适宜简化栽培的多系品种,在保证较大的播种量发挥群体顶土作用的前提下,利用其对除草剂的抗性差异,根据出苗情况,通过有选择地喷施特定除草剂达到同时间苗和除草的目的。

同时利用显性抗除草剂材料做恢复系,解决了谷子杂种优势利用中存在的去除假杂种难题,利用除草剂拌种或者出苗后喷施除草剂杀掉不育系自交苗,实现了谷子杂交种的大面积应用。

在上述研究基础上,我国的抗除草剂育种开始了起步,2005年育成第一个抗除草剂杂交种张杂谷3号^[38],年最大推广面积6.3万 hm^2 ;2006年育成第一个抗除草剂多系品种冀谷25^[39],年最大推广面积4.1万 hm^2 。

2.2 优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产阶段 (2009—2018)

2009 年, 国家谷子产业技术体系正式启动, 谷子育种目标聚焦于适合产业化生产的优质、抗除草剂、适合机械化生产品种选育, 并在广适性品种选育方面取得显著突破。2008—2015 年期间, 有 95 个谷子品种通过全国农业技术推广服务中心组织的品种鉴定, 其中包括 35 个一级优质品种, 占 36.8%, 28 个抗除草剂品种和杂交种, 占 29.5%, 其中冀谷 31 连续 6 年居全国夏谷面积第一位, 年推广面积突破 8 万 hm^2 , 是同期全国仅有的年推广面积超过百万亩的两个品种之一; 张杂谷 3 号杂交种 2015 年应用面积达 6.3 万 hm^2 。

在优质广适品种选育方面, 河南安阳市农业科学院育成的豫谷 18 成为标志性品种^[40]。谷子具有光温敏感特性, 我国谷子主产区划分为华北夏谷区、西北春谷中晚熟区、西北春谷早熟区、东北春谷区, 广适的目标是通过选育早熟、光温反应不敏感的类型, 实现在华北、西北、东北跨生态区应用。2008 年之前的品种很难跨生态区推广应用。豫谷 18 先后参加全国 4 个生态区的区域适应性鉴定, 均表现突出, 成为第一个能在全国 4 个生态区推广应用的谷子品种, 而且商品品质、食味品质俱佳, 被评为一级优质米, 而且具有良好的配合力, 育成后很快成为骨干亲本。但是, 豫谷 18 不抗除草剂, 成为大面积应用的限制因素。

2016 年以来, 在“十三五”国家产业技术体系支持下, 谷子育种目标进一步明确, 实现优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产等优良性状聚合成为主要目标, 抗除草剂育种显著加快, 2017 年新育成并参加全国谷子品种区域适应性联合鉴定 4 组试验的 48 个谷子品种中, 有 24 个品种为抗除草剂品种/杂交种, 占 50%。冀谷 39、冀谷 42、豫谷 32、豫谷 35、中谷 9、金苗 K1、张杂谷 13 等实现优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产等优良性状聚合^[5,37,41]。

在新型抗除草剂品种选育方面, 河北先后育成抗咪唑乙烟酸的冀谷 33, 兼抗烯禾啶和咪唑乙烟酸的冀谷 35、冀谷 39, 抗烯禾啶、咪唑乙烟酸兼抗烟嘧磺隆的品种冀谷 43。

在专用品种选育方面, 河北育成了适合主食

加工的高谷蛋白品种冀谷 T6, 高抗性淀粉品种冀谷 T7^[42]。

本阶段在实现优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产的目标的同时, 全国谷子面积停止下滑, 基本稳定在 80 万 hm^2 , 单产也有了明显提升, 2018 年全国谷子平均单产达 200.62 $\text{kg}/667 \text{ m}^2$, 较 2008 年的 105.23 $\text{kg}/667 \text{ m}^2$ 提高 90.6%, 主产区百亩以上大面积单产 350~400 $\text{kg}/667 \text{ m}^2$ 得以实现, 小面积最高单产达 810.2 $\text{kg}/667 \text{ m}^2$ 。

2.3 优质广适抗除草剂育种进一步突破、生物育种起步阶段 (2018 年之后)

2019 年以来, 优质广适抗除草剂育种进一步突破, 2019—2022 年, 全国谷子品种区域适应性联合鉴定 4 组试验参试品种中, 抗除草剂品种分别占 70%、71%、84%、89%, 特别是华北夏谷组和东北春谷组, 2022 年参试品种抗除草剂品种比例分别达 100% 和 95%。

在优质抗除草剂育种方面, 河北利用优质品种“黄金苗”育成了早熟优质的冀杂金苗 1 号、冀杂金苗 3 号、冀杂金苗 4 号; 内蒙古育成品质进一步提升的抗除草剂品种金苗 K6。

在广适抗除草剂方面, 河北采用豫谷 18 为亲本育成的抗除草剂品种冀谷 168, 品质与豫谷 18 相近, 抗病性、适应性均超过豫谷 18, 而且具有高冻融稳定性、适合冷冻主食加工的优点。

在新型抗除草剂品种选育方面, 河北育成了国内外第一个抗嘧草硫醚品种冀谷 47。

在专用品种选育方面, 育成了可延长谷子加工食品保质期、油酸含量较普通品种提高 1.4 倍的高油酸品种冀谷 48 和冀谷 49。

在此阶段, 抗除草剂品种得到广泛应用, 全国年推广面积前 5 位的谷子品种有 4 个为抗除草剂类型。

在此期间, 谷子生物育种取得初步进展。中国农业科学院作物科学研究所建立了谷子高效遗传转化体系, 遗传转化率达 40% 以上, 编辑出谷子单倍体诱导系^[43]、不育系; 发掘出 3 个主效矮秆 QTL, 其中 $qPH1.3$ 效应值 2.37%~11.88%, $qPH9.2$ 效应值 5.07%~10.08%, $qPH9.5$ 效应值 3.87%~13.35%, 开发了这三个位点的分子标记, 实现了谷子株高性状精准设计育种, 多环境定位

区间联合分析鉴定到 *qPH1.3* 候选基因 *SiGA2ox1* (*Seita.1G242300*), 不同于小麦水稻绿色革命中广泛应用的 *Rht* 和 *SD1* 矮秆基因, 该基因通过分解活性 GA 实现降秆, 转基因功能验证表明, 该基因在降低株高的同时, 未产生显著副作用, 为作物株高育种提供了新的矮化基因^[44]。河北通过分子标记辅助育种方法育成了抗噬草硫醚品种冀谷 47, 高油酸品种冀谷 48 和冀谷 49; 基因编辑创制出单倍体诱导系、高油酸材料、广谱抗病毒材料等。

3 结论

新中国成立以来, 我国谷子育种发生翻天覆地的变化。在育种手段方面, 1950—2000 年从最初的农家种整理、系统选育逐步实现了杂交育种为主、理化诱变育种为辅, 并初步实现了杂种优势利用。2001 年之后, 实现了抗除草剂育种的突破和杂交种大面积应用, 近年来又在谷子高效遗传转化体系、分子标记辅助育种、基因编辑育种方面取得显著进展。

在育种目标方面, 从最初的追求高产、高产兼顾优质, 逐步过渡到优质高产并重, 优质、广适、抗除草剂、适合机械化生产并重, 近年来又开始了高冻融稳定性适合冷冻主食加工、高油酸适合主食产品加工等专用品种选育。

在突破性品种选育与应用方面, 从最初的几百个品种适应千变万化的生态和生产条件、没有广适性品种和抗除草剂品种, 逐步发展到全国应用二三十个骨干品种、推广面积前 5 位的谷子品种 80% 抗除草剂的新局面。

在产量方面, 品质逐步提升的同时实现了全国谷子平均单产较 1950 年提升近 3 倍, 主产区大面积平均单产 350~400 kg/667 m² 得以实现, 小面积最高单产达 810.2 kg/667 m²。

随着分子标记辅助育种、基因编辑育种、全基因组选择育种等生物育种手段在谷子育种中的应用, 以及谷子产业链延伸对优质专用品种的需要, 未来谷子育种还将不断发展, 使谷子这一原产于中国的古老作物焕发新的生机, 为我国干旱半干旱中低产田的粮食生产和国家粮食安全做出新的贡献。

参考文献:

- [1] 李荫梅. 《谷子育种学》[M]. 中国农业出版社, 1997.
LI Y M. Millet Breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.
- [2] 刁现民. 基础研究提升传统作物谷子和黍稷的科研创新水平[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3.
DIAO X M. Basic research promoting scientific innovation for traditional Chinese cereals, foxtail millet and common millet[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(17): 3.
- [3] SHARMA N, GOYAL S K, ALAM T, et al. Effect of germination on the functional and moisture sorption properties of high-pressure-processed foxtail millet grain flour[J]. Food & Bioprocess Technology, 2018.
- [4] PRASAD M. The foxtail millet genome[J]. Compendium of Plant Genomes, 2017.
- [5] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459-470.
LI S G, LIU F, LIU M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470.
- [6] 李正名. 《中国特有谷子作物科技的创新前沿》[M]. 南开大学出版社, 2021
LI Z M. The S&T innovation forefront of an unique to China crop-The Millet[M]. Nankai University Press, 2021.
- [7] 张婷, 师志刚, 王根平, 等. 华北夏谷区 2001—2015 年谷子育种变化[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 11.
ZHANG T, SHI Z G, WANG G P, et al. The alterations of foxtail millet breeding in north China summer-sowing region from 2001 to 2015[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(23): 11.
- [8] 程汝宏, 刘正理. 我国谷子育种目标的演变与发展趋势[J]. 河北农业科学, 2003, 7(B09): 4.
CHENG R H, LIU Z L. Evolution of breeding objectives of foxtail millet and its developing tendency in China[J]. Hebei Agricultural Science, 2003, 7(B09): 4.
- [9] 张艾英, 刁现民, 郭二虎, 等. 西北春谷早熟区谷子品种十五年变化趋势及主要性状分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4497-4506.
ZHANG A Y, DIAO X M, GUO E H, et al. Research progress and major traits of foxtail millet cultivars developed in the early-mature spring-sowing region in the past 15 years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(23): 4497-4506.
- [10] 王钰. 昭谷一号的阶段管理[J]. 辽宁农业科学, 1985(5).
WANG Y. Phase management of Zhaogu 1 hao[J]. Liaoning Agricultural Science, 1985(5).
- [11] 刘正理, 程汝宏, 张凤莲, 等. 华北夏谷区主要谷子品种及其系谱演变与遗传基础分析[J]. 华北农学报, 2006, 21(Oz2):

- 103-109.
LIU Z L, CHENG R H, ZHANG F L, et al. Millet variety in boreali sinica summer millets region and its pedigree evolution and analysis on genetic foundation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 021(0z2): 103-109.
- [12] 姜文元. 杂交谷子黄系 4×1007 与蒜系 28×张农 10 号[J]. 现代农业, 1987(12).
JANG W Y. Hybrid millet yellow line 4×1007 and garlic line 28× Zhangnong 10 hao[J]. Modern Agriculture, 1987(12).
- [13] 全建章, 李志勇, 马继芳, 等. 谷子种质资源抗锈创新和冀创谷材料选育研究[J]. 中国作物学会学术年会, 2018.
QUAN J Z, LI Z Y, MA J F, et al. Anti-rust innovation of millet germplasm resources and research on material selection of Jichuang Valley[J]. Annual Conference of Chinese Crop Society, 2018.
- [14] 王宗德, 王贵卿. 高产、优质、抗病谷子新品种豫谷 2 号[J]. 河南科技, 1991(6): 32.
WANG Z D, WANG G Q. A new millet variety with high yield Yugu 2 Hao, high quality and disease resistance[J]. Henan Technology, 1991(6): 32.
- [15] 程汝宏, 刘正理. 夏谷新品种冀谷 14 号的选育[J]. 河北农业科学, 1998, 2(2): 5.
CHENG R H, LIU Z L. Breeding of a new summer valley variety Jigu 14 Hao[J]. Hebei Agricultural Science, 1998, 2(2): 5.
- [16] 李香月. 优质夏谷新品种“冀特 2 号”[J]. 种子, 1991(2).
LI X Y. A new variety of high quality summer grain Jite 2 Hao[J]. Seed, 1991(2).
- [17] 陈瑛, 卫天业, 景小兰, 等. 晋谷 21 号的选育及推广前景[J]. 山西农业科学, 1992(12): 2.
CHEN Y, WEI T Y, JING X L, et al. Breeding and promotion prospect of Jingu 21 Hao[J]. Shanxi Agricultural Science, 1992(12): 2.
- [18] 田瑞珍. 冀特 1 号夏谷[J]. 种子世界, 1991(2): 1.
TIAN R Z. Summer valley Jite 1 Hao[J]. Seed World, 1991(2): 1.
- [19] 李琳, 程汝宏, 王根平, 等. 谷子不育系与杂种优势利用研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2018, 26(10): 10.
LI L, CHENG R H, WANG G P, et al. Research progress of application of heterosis and sterile line in foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2018, 26(10): 10.
- [20] 崔文生, 马洪锡, 张德勇. 谷子雄性不育系“蒜系 28”的选育与利用[J]. 中国农业科学, 1979(1).
CUI W S, MA H X, ZHANG D Y. Breeding and utilization of millet male sterile line Suanxi 28[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1979.
- [21] WANG R Q, GAO J H, MAO L P, et al. Chromosome Location of the Male Sterility and Yellow Seedling Gene in Line 1066A of Foxtail Millet[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(10): 1209-1212.
- [22] 王绍滨. 谷子两系杂交种龙杂谷 1 号及其制种技术[J]. 现代农业, 1999.
WANG S B. Two-line millet hybrid Longzagu 1 Hao and its seed production technology[J]. Modern Agriculture, 1999.
- [23] 谷子品种冀谷 16 号: DB13/T 317—1997[S]. 河北省地方标准. Millet variety Jigu 16: DB13/T 317—1997[S]. Hebei Province Local Standard.
- [24] 赵治海. 谷子新品种张杂谷 1 号[J]. 现代农村科技, 2002, 11(3): 15.
ZHAO Z H. A new millet variety Zhangzagu 1 Hao[J]. Modern Rural Science and Technology, 2002, 11(3): 15.
- [25] 优质高产谷子新品种“谷丰 2 号”和“小香米”[J]. 中国科技成果, 2003(18).
New high-quality and high-yield millet varieties Gufeng 2 Hao and Xiaoxiangmi[J]. Chinese scientific and technological achievements, 2003(18).
- [26] 秦永兵, 谢明杰, 王素英, 等. 优质高产大穗谷子新品种豫谷 19 选育及应用[J]. 中国科技成果, 2019(10): 3.
QIN Y B, XIE M J, WANG S Y, et al. Breeding and application of new variety Yugu 19 with high quality and high yield[J]. Chinese scientific and technological achievements, 2019(10): 3.
- [27] 郭二虎, 范惠萍, 王秀清, 等. 优质高产谷子新品种长农 35 号的选育[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 4.
GUO E H, FAN H P, WANG X Q, et al. Breeding of a new millet variety Changnong 35 with high quality and high yield[J]. China Agronomy Bulletin, 2008, 24(8): 4.
- [28] 程汝宏, 师志刚, 刘正理, 等. 谷子简化栽培的育种与配套技术研究及应用[J]. 中国科技成果, 2013(17): 2.
CHENG R H, SHI Z G, LIU Z L, et al. Research and application of breeding and supporting technology of millet simplified cultivation[J]. Chinese scientific and technological achievements, 2013(17): 2.
- [29] 程汝宏, 师志刚, 刘正理, 等. 简化栽培谷子品种选育及其配套栽培方法: CN1586159A[P]. 2005.03.02.
CHENG R H, SHI Z G, LIU Z L, et al. Research of breeding and supporting technology of millet simplified cultivation: CN1586159A[P]. 2005.03.02.
- [30] 李顺国, 夏雪岩, 刘猛, 等. 我国谷子轻简高效生产技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(2): 19-24.
LI S G, XIA X Y, LIU M, et al. Research progress on light simple and efficient production technology of foxtail millet in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(2): 19-24.

- [31] DARMENCY H, J P. Use of wild *Setaria viridis* (L.) Beauv. to improve triaxinc resistance in cultivated *S. italica* (L.) by hybridization[J]. Weed Res, 1985(25): 175-179.
- [32] 王天宇, 石云素, 辛志勇, 等. 抗除草剂谷子新种质的创制、鉴定与利用[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(5): 62-66.
WANG T Y, SHI Y S, XIN Z Y, et al. A creation, evaluation and utilization of the new crop germplasm: herbicide resistance foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2000, 2(5): 62-66.
- [33] 王天宇. 抗除草剂谷子新种质的研究与综合利用[J]. 中国农业科学院, 1998.
WANG T Y. Study and utilization of herbicide resistance in foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 1998.
- [34] LAPLANTE J, TARDIF I R J. Multiple allelic forms of acetohydroxyacid synthase are responsible for herbicide resistance in *Setaria viridis* [J]. Theoretical & Applied Genetics, 2009.
- [35] 师志刚. 谷子抗咪唑乙烟酸材料创新与应用[J]. 中国农业科学院, 2014.
SHI Z G. The creation and application of new imazethapyr resistant foxtail millet germplasm [J]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [36] 夏雪岩, 师志刚, 刘猛, 等. 谷子新品种冀谷 35 及其轻简化配套栽培技术[J]. 中国种业, 2016(10): 2.
XIA X Y, SHI Z G, LIU M, et al. A new millet variety Jigu 35 and its light and simplified supporting cultivation techniques [J]. China Seed Industry, 2016(10): 2.
- [37] 师志刚, 王根平, 张婷, 等. 冀谷系列抗除草剂优质谷子新品种[J]. 现代农村科技, 2017(7): 1.
SHI Z G, WANG G P, ZHANG T, et al. Jigu series of new herbicide-resistant high-quality millet varieties [J]. Modern Rural Science and Technology, 2017(7): 1.
- [38] 杨建勇. 张杂谷 3 号高产栽培技术[J]. 种子科技, 2010, 28(1): 43-44.
YANG J Y. High-yielding cultivation techniques of Zhangzagu 3 [J]. Seed Technology, 2010, 28(1): 43-44.
- [39] 程汝宏, 师志刚, 刘正理, 等. 抗除草剂简化栽培型谷子品种冀谷 25 的选育及配套栽培技术研究[J]. 河北农业科学, 2010, 14(11): 5.
CHENG R H, SHI Z G, LIU Z L, et al. Breeding of foxtail millet cultivar Jigu 25 resistant to herbicide, suitable for simplified cultivation and corresponding cultivation techniques [J]. Hebei Agricultural Science, 2010, 14(11): 5.
- [40] 刘海萍, 刘金荣, 王素英, 等. 优质高产稳产谷子新品种豫谷 18 的选育与栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2013(7): 3.
LIU H P, LIU J R, WANG S Y, et al. Breeding and cultivation techniques of new millet variety Yugu 18 with high quality, high yield and stable yield [J]. Agricultural Science and Technology Newsletter, 2013(7): 3.
- [41] 宋国亮, 赵治海, 王晓明, 等. 优质杂交谷子新品种张杂谷 13 号的选育及栽培技术[J]. 现代农村科技, 2022(5).
SONG G L, ZHAO Z H, WANG X M, et al. Breeding and cultivation techniques of new high quality hybrid millet variety Zhangzagu 13 [J]. Modern Rural Science and Technology, 2022(5).
- [42] 张婷, 师志刚, 王根平, 等. 冀谷 T7 品种简介[J]. 现代农村科技, 2017.
ZHANG T, SHI Z G, WANG G P, et al. Introduction of Jigu T7 variety [J]. Modern Rural Science and Technology, 2017.
- [43] CHENG Z, SUN Y, YANG S, et al. Establishing in planta haploid inducer line by edited SiMTL in foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. Plant Biotechnol J, 2021.
- [44] QTL mapping for foxtail millet plant height in multi-environment using an ultra-high density bin map [J]. Theor Appl Genet: 1-16. 完