

彩色小麦种质资源在生物强化和功能食品应用中的研究进展

张正斌^{1,2}, 徐萍^{1,2}, 张锦鹏³, 李芙蓉¹

(¹中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022; ²中国科学院种子创新研究院, 北京 100101;

³中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 因为人类膳食不平衡和微量营养缺乏导致的隐性饥饿已经受到国内外高度重视。利用生物育种技术培育富含各种微量营养的优良作物品种是生物强化和功能食品的主要发展方向。国内外大量研究表明, 彩色小麦种质资源富含花青素、铁、锌、硒、维生素、叶酸等微量营养和蛋白质等, 对抗炎、抗癌、糖尿病、心脑血管疾病、贫血病、生长发育不良等有一定的功效, 将在保障粮食安全和人类健康中发挥重要作用。本研究首先介绍了隐性饥饿、生物强化、功能食品、功能农业和功能品种等方面的发展趋势, 重点介绍了国内外彩色小麦种质资源功能营养成分及遗传育种方面的研究进展。建议广泛收集和创制彩色功能营养小麦新种质, 挖掘优异营养基因资源, 揭示彩色小麦花青素和微量营养(硒、锌、铬等微量元素, 维生素, 人体不能合成的8种氨基酸, 叶酸等)以及品质(蛋白质含量和组分)性状的遗传耦合机理, 以期对彩色小麦生物强化和主粮功能化提供理论依据和技术支撑。

关键词: 彩色小麦; 生物强化; 功能食品; 应用前景

Research Progress in Application of Colored Wheat Germplasm Resources in Biofortification and Functional Foods

ZHANG Zheng-bin^{1,2}, XU Ping^{1,2}, ZHANG Jin-peng³, LI Fu-rong¹

(¹Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022; ²Innovative Academy of Seed Design, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ³Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Hidden hunger caused by imbalanced human diet and lack of micronutrients has been paid increasing attention. One solution in achieving biofortification and functional food is to breed excellent crop varieties rich with various micronutrients by deployment of biological breeding technologies. A large number of studies have shown enrichment of anthocyanin, iron, zinc, selenium, trace nutrients and vitamins, folic acid, protein in color wheat germplasm resources. These components have certain effect for treatment of inflammation, cancer, diabetes, cardiovascular disease, anemia, and poor growth and development, etc, thus showing an important role in ensuring food security and human health. In this paper, we first introduce the background information of hidden hunger, biofortification, functional food, functional agriculture and functional varieties, followed by a highlighted summarization on the research progress of functional nutrition components and genetic breeding of colored wheat germplasm resources. We suggest to collect and create new color functional nutrition wheat germplasm, explore genes with excellent nutritional components, reveal the genetic coupling mechanism among anthocyanins and micronutritions (trace elements such as selenium,

收稿日期: 2022-03-21 修回日期: 2022-03-29 网络出版日期: 2022-04-11

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220321004>

第一作者研究方向为小麦遗传育种, E-mail: zzb@sjziam.ac.cn

基金项目: 河北省现代种业科技创新专项(22326302D); 中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0069); 农业农村部“十四五”小麦种质资源精准鉴定项目(19221925)

Foundation projects: Scientific and Technological Innovation of Modern Seed Industry of Hebei Province(22326302D); The Central Government Guides Local Science and Technology Development Fund Project(2022ZY0069); Accurate Identification Project of Wheat Germplasm Resources in the 14th Five-year Plan of Ministry of Agriculture and Rural Affairs(19221925)

zinc and chromium, vitamins, 8 amino acids that cannot be synthesized by human body), in order to provide theoretical basis and technical support for color wheat biofortification and main grain functionalization.

Key words: colored wheat; biofortification; functional foods; application prospect

小麦是全球分布最为广泛的粮食作物,世界上有超过 40% 的人口以小麦为主食。小麦为人类提供了约 21% 的食物热量和 20% 的蛋白质。中国是世界第一大小麦生产国,常年小麦播种面积有 0.2 亿公顷,总产量 1 亿吨,也是世界第一大小麦消费国^[1]。随着作物矮秆高产、超高产育种绿色革命的快速发展,农业水肥和农业机械化等生产条件的提高,农药除草剂被大量使用,出现了小麦产量高但品质和营养水平低的矛盾。特别是现代部分人群对精米、白面、高糖、高蛋白、高油脂食品的偏爱和膳食不平衡,导致谷物种皮和糊粉层里的许多微量营养没有被高效利用,同时还出现肥胖症、糖尿病等富贵病^[2]。此外,在许多偏远不发达国家和地区,由于部分土壤缺铁、硒、锌和碘等微量元素,粮食作物品种产量低,食物单一和缺乏,在妇女和儿童中普遍出现缺铁导致的贫血病等疾病;由于微量营养摄入不足而导致人群健康水平低下,影响经济发展,在国际上被称为隐性饥饿^[3]。近 30 年来,国际上发起了生物营养强化挑战项目,旨在利用生物育种技术培育出富含各种微量营养的优质作物品种和功能性品种^[4-5],同时功能食品、主粮功能化也在快速发展^[6-8]。目前在我国,随着人们生活水平的提高,从吃饱吃好到吃出营养健康,已经成为人民群众对美好生活的追求。国内外大量研究表明,彩色小麦富含花青素、铁、锌、硒、维生素、叶酸等微量营养和蛋白质,对抗炎、抗癌、糖尿病、心脑血管疾病、贫血病、生长发育不良等有一定的功效,成为生物强化育种和功能性品种的种质资源和功能食品的首选^[9-10],将在保障粮食安全和人类健康中发挥重要作用。目前关于彩色小麦营养强化遗传育种和产业化逐渐受到重视,近年来,有一些彩色小麦品种作为特色小麦通过省级审定;山东省农业农村厅《2021 年全省小麦秋种技术意见》中明确指出,积极扩大强筋小麦和糯小麦、紫小麦、富硒小麦等特色专用小麦种植面积,努力提高小麦种植效益。但有关彩色小麦功能营养遗传育种和产业化的综述少见报道,本研究将重点介绍国内外隐性饥饿、生物强化、功能品种、彩色小麦种质资源遗传育种及营养健康功能中的研究进展,以期对彩色小麦生物强化和主粮功能化提供理论依据和技术支撑。

1 隐性饥饿威胁人类健康

一般将能量、蛋白质和脂肪等摄入不足导致的营养不良、身体瘦弱的状态称为“显性饥饿”;将营养不良、缺乏某种维生素及人体必需的矿物质、其他营养成分摄入过量,造成人体不健康的状态称为“隐性饥饿”。隐性饥饿会增加癌症、糖尿病、心血管疾病等慢性病的风险,会影响人的智力、体力、免疫力以及造成出生缺陷,严重危害身体健康,隐性饥饿正成为人类健康的致命杀手。目前世界上有超过 20 亿人口、中国有超过 3 亿人口处于隐性饥饿状态,是值得关注和有待解决的重要问题之一^[11]。

缺铁性贫血导致儿童智商平均降低 5~8; 缺碘导致儿童智商平均降低 10~15; 缺锌导致性发育迟缓、注意力不集中、偏食、复发性口腔炎等; 缺硒导致血溶性贫血、高血压、糖尿病、心脏病、白内障、大骨节病、肝硬化、癌症等。缺乏维生素 A 导致容易感冒、腹泻、眼睛干涩疲倦; 缺乏维生素 B1 导致忧郁以及记忆力衰退等; 缺乏维生素 D 可导致佝偻病^[12-13]。健康中国行动(2019-2030 年)报告中指出,2013 年,我国有 8.1% 的 5 岁以下儿童表现为生长迟缓,儿童、孕妇、老年人群贫血率仍较高,铁、钙、维生素 A、维生素 D 等微量营养素缺乏依然存在,膳食纤维摄入明显不足^[2]。

2016 年全球疾病负担研究表明,有 15.9% 的疾病负担是由饮食引起的。我国人群疾病由 20 世纪 80 年代以前以营养缺乏的贫血病等为主,转变为现在城镇人群因为营养过剩和膳食不平衡(高盐、高糖、高脂)等导致的富贵病为主,糖尿病、心脑血管疾病、慢性呼吸系统疾病、癌症等慢性病导致的负担占总疾病负担的 70% 以上,成为制约营养健康和预期寿命提高的关键问题。因此由膳食不平衡、微量营养缺乏造成的亚健康 and 富贵病值得高度重视。健康中国行动的目标是:至 2022 年,要遏制糖尿病、心脑血管疾病、慢性呼吸系统疾病、癌症等重大慢性病发病率上升趋势;至 2022 年和 2030 年,要持续减缓成人肥胖增长率,5 岁以下儿童生长迟缓率分别低于 7% 和 5%、贫血率分别低于 12% 和 10%,孕妇贫血率分别低于 14% 和 10%^[2]。

2 生物强化育种是解决隐性饥饿的根本途径

20世纪60年代,小麦等作物矮秆高产育种成为第1次绿色革命的重要起点,在保障世界粮食安全方面发挥了重要作用。然而第1次绿色革命不久,化肥、农药的大量使用导致环境污染和土壤退化。20世纪90年代初,出现高产谷物中矿物质和维生素含量很低的问题,影响人体健康、降低劳动生产率,经济发展受阻,即隐性饥饿问题^[14]。

小麦是世界大部分地区的主食,也是许多加工食品的原料,是食物强化的首选。采用面粉营养强化改善隐性饥饿已成为世界发展潮流。我国公众营养与发展中心2002年在甘肃省兰州市和河北省承德市组织实施了“退耕还林补助面粉营养强化试点”,一年半后的食用效果表明,维生素A、维生素B1、维生素B2、尼克酸、叶酸、铁、锌等微量营养素水平在强化面粉食用人群中全面提高^[15]。国家公众营养改善项目办公室在国际经验和国内试点基础上,确定了“7+1”配方的营养强化面粉,即在面粉生产过程中添加铁、钙、锌、硫胺素(维生素B1)、核黄素(维生素B2)、尼克酸、叶酸等7种营养素,并推荐添加维生素A。近10年来,为了预防新生儿神经管缺陷疾病,我国许多地方还推行了免费给育龄妇女增补叶酸的措施。但人工添加营养强化面粉有代价高、部分营养非有机、且难以被人体完全有效吸收等许多不足之处^[16]。

近年来,国内外提出了第2次绿色革命的设想,即进行生物营养强化育种(Biofortification),培育既高产又富含氨基酸、维生素和矿物质的作物新品种。这样可以减少面粉中各种营养元素的人工添加,降低营养健康食品的生产成本,对于全球数十亿生活在边远地区因无力购买富有营养的食物而营养不良、无力购买较贵的合成化学药品治疗疾病的人们带来了很大的希望^[17-18]。

国际食物政策研究所(IFPRI, international food policy research institute)1995年联合12个国家开展了“富含铁、锌等微量营养成分的谷物品种培育计划”。2004年与国际农业研究磋商组织(CGIAR, consultative group on international agricultural research)、国际热带农业研究中心(CIAT, consultative group on international agricultural research)共同发起国际生物强化(Harvestplus)项目:第一阶段目标是提高水稻、小麦、玉米、木薯、甘薯和大豆等作物中的铁、锌、

维生素A等的含量;第二阶段将生物强化扩大到大麦、香蕉、高粱、花生、马铃薯等作物上面。旨在通过生物强化育种技术,选育富含微量营养的作物新品种,以期有效解决广大贫困人口微量营养缺乏的问题^[19]。

经过多年发展,国际小麦玉米改良中心(CIMMYT, international wheat and maize improvement center)选育的生物强化小麦品系铁和锌含量分别达到47 mg/kg和55 mg/kg,比大面积种植的品种高出近一倍^[20]。美国研究人员发现野生二粒小麦中富含锌和铁^[21],通过野生小麦(山羊草等)与常规小麦进行杂交,明显提高了小麦中铁、锌和蛋白质含量;和普通小麦相比,在用其做成的食物中,蛋白质和微量元素含量提高了10%~15%^[22]。许多发展中国家都积极发展生物强化,如:印度投资150万美元,在水稻、小麦和玉米中开展生物强化育种研究。

我国生物强化育种项目始于2004年,范云六等^[23]在水稻、玉米、小麦和甘薯4种作物中进行生物强化研究,取得了较大进展。该研究在小麦中铁育种目标是25 μg/g,锌育种目标是9 μg/g。选育的小麦品种里含铁43~48 μg/g,接近育种目标的两倍,锌含量达到41 μg/g,是育种目标的4倍。其中,小麦品种京冬8号和中育9507铁和锌含量均较高。

3 全谷物食品有助于人类健康

许多微量营养如花青素、维生素等都富集在谷物种皮和糊粉层中,随着食品科学和精细加工技术的快速发展,全谷物(Wholegrain)食品加工成为国内外发展新趋势,全谷物食品摄入成为补充人类微量营养的一个重要途径。西方发达国家在20世纪80年代便开始对全谷物食品进行研究。1993年美国农业部等机构联合发起了国际上第一个全谷物的专题会议。2005年欧盟启动了“健康谷物”(Health grain)综合研究计划项目。2010年欧盟健康谷物协会正式成立。美国农业部和卫生与公众服务部2020年发布《美国居民膳食指南(2020-2025)》,建议每天摄入谷物的一半为全谷物。澳大利亚膳食指南则建议成人每天摄入120~180 g谷物,其中大部分应为全谷物。我国粮油工业“十二五”发展规划也明确提出要推进全谷物营养健康食品的研发和产业化^[24],中国疾病预防控制中心营养与健康所等8家专业机构联合发布了《全谷物与健康的科学共识(2021)》,并明确指出,食用全谷物可降低糖尿病、心

血管疾病和某些癌症的患病风险,有助于维持健康体重。《中国居民膳食指南》中建议每天摄入全谷物、杂豆类食物 50~150 g^[25]。

小麦面粉是通过种子清理、研磨、筛理等多种加工手段,把胚乳或胚与麦麸分开,由胚乳研磨而成。矿物质和维生素主要存在于小麦胚芽和皮层,在小麦去皮过程中损失 80% 左右的营养成分,面粉中营养成分仅占全麦粉营养成分的 10%~30%,特别是高精度面粉中营养成分含量更低,主要是营养价值低的淀粉。随着面粉精度的不断提高,其维生素和微量元素损失不断增加。当出粉率(面粉重量/原料种子重量)由 85% 降至 75% 时,维生素 B1 含量从 3.42 μg/g 减到 0.7 μg/g,维生素 B2 含量从 0.68 μg/g 减到 0.37 μg/g,烟酸含量从 25 μg/g 降到 10 μg/g^[26]。出粉率在 60% 时,小麦粉和小麦相比,B 族维生素损失 85% 左右,维生素 E 损失 50% 左右,铁、钙、锌等分别损失 80%、50% 和 8% 以上^[27]。我国每年因过度加工损失粮食 75 亿 kg,2014 年农业部印发《关于加强粮食加工减损工作的通知》指出,防止过度加工造成的粮食、营养和能源的浪费,大力发展专用米、糙米、米糠食品、专用粉、全麦粉、小麦麸皮制品等新型营养健康食品及系列化、优质化、方便化主食食品^[28]。

长期单纯食用营养价值低的精制面粉,人体微量营养缺乏、膳食不平衡导致的三高(高血糖、高血脂、高血压)疾病越来越多。同时富含营养的麸皮作为动物饲料是对营养和粮食的很大浪费。摄入全谷物可以降低患癌症的风险和特异性部位癌症的风险^[29]。在我国三高(高血糖、高血脂、高血压)患者是全谷物面粉的主要消费者。

4 功能食品到功能农业再到功能品种的深入发展

随着营养强化食品的深入发展,出现了功能食品的新概念。营养强化食品主要以向食物中添加某种营养素来达到营养平衡,以防止某些营养缺乏症出现为目的。而功能食品是含有一些调节人体生物节律、提高免疫能力和防止衰老等有效功效成分的食品。

日本 1987 年在《食品功能的系统性解释与展开》中提出了“功能性食品”,美国 1994 年实施的新《食品标签法》突出了营养与健康的主题,欧盟 1996 年召开了“功能食品的科学概念及其功能成分应用的科学基础”会议^[30]。

早在几千年前中国的医药文献中就记载了与现代功能食品相类似的论述,如“医食同源”、“食疗”、“食补”等。我国功能性食品定义同保健食品,是指具有特定保健功能或者以补充维生素、矿物质为目的的食品,适用于特定人群食用,具有调节机体功能的食品^[31]。我国较流行的是具有抗氧化、降血糖、降血脂、润肠通便、缓解体力疲劳、减肥、提高免疫力及祛黄褐斑等功能的保健食品。

2013 年 Ruel 等^[32]提出了营养导向型农业的概念。2017 年国际粮农组织(FAO, international food and agriculture organization)提出:营养导向型农业是以可持续发展式满足居民膳食需求的新型农业模式,旨在确保生产量足质优且价格合理、营养丰富、文化适宜、安全的各种食物,营养和健康是其最终目标和衡量标准^[33]。2009 年中国科学院农业领域战略研究组^[34]提出,功能农业是通过生物营养强化技术或其他生物工程生产出具有健康改善功能的农产品。功能农业是继高产农业、绿色农业之后的第三个发展阶段^[34]。我国“十三五”设立了国家重点研发计划“食品营养及生物活性物质的健康功能作用研究”专项,目前正在开展的健康中国行动(2019-2030 年),重点强调科学膳食保障人民健康。山东农业大学田纪春结合全球倡导的营养导向型农业和功能性食品的内容,2021 年首次提出“功能性小麦品种”的概念,将其定义为“含有对人体健康有益的活性成分,可调节人体有益代谢,能给人体健康带来某种益处或满足特定人群的特殊需求,同时可以作为日常食物的口感正常、无毒副作用的小麦品种类型”。田纪春等^[5]育成了麦黄酮、高色素、高抗性淀粉、富锌、低醇溶蛋白和低植酸等功能性小麦新品种(系),将在小麦生物强化和功能食品产业化中发挥重要作用。

从营养强化食品到营养强化育种,再到功能性食品、营养导向型农业、功能农业和功能品种成为新的现代健康农业发展方向。

5 彩色小麦种质资源在生物强化和功能食品应用中的研究进展

国内外大面积种植的小麦大多数是白粒小麦,其种皮中不含有决定籽粒颜色的花青素成分。彩色小麦是指小麦粒色为红色、紫色、褐色、蓝色、黑色、绿色等的一类特色小麦种质资源,主要是由于其种皮或糊粉层中含有决定籽粒颜色的花青素成分,花青素成分不同导致了小麦籽粒颜色的不同。

5.1 国外彩色小麦种质资源在生物强化和功能食品应用中的研究进展

美国伊利诺斯农业研究所培育出一种 WS3 紫小麦,含有丰富的赖氨酸和蛋白质,分别比普通小麦高 35% 和 1 倍以上;另外,还含铁、钾等微量元素和矿物质成分,综合营养价值远远高于普通小麦^[35]。加拿大研究人员报道,利用埃塞俄比亚紫色四倍体小麦培育出了加拿大第 1 个紫麦品种,紫麦花色苷富含有益于人体健康的抗氧化剂,有降低体内炎症和血糖浓度的效果。用紫麦酿造的伏特加酒略带甜香,还有一丝巧克力、香草和萨斯喀通浆果的味道,在 2019 年获得了最高的国际消费者奖 SIP 白金奖^[36]。

Sharm 等^[37]研究表明,黑粒小麦显著降低了小鼠体重的增加量和脂肪垫。黑粒和紫粒小麦均可降低小鼠血清中的总胆固醇、甘油三酸酯和游离脂肪酸水平,从而恢复血糖和胰岛素抵抗。黑粒小麦显著提高了脂肪酸平衡、 β -氧化和氧化应激相关酶的表达,与 qRT-PCR 和 RNA-Seq 结果一致。对小鼠脂肪和肝脏组织的转录组分析显示,补充黑粒小麦组的小鼠可激活与脂肪酸 β 氧化 (*crat*, *acca2*, *lonp2* 等)、抗氧化酶 (*gpx1*, *sod1*, *nxn1* 等) 有关基因和多种途径,以维持脂肪酸代谢平衡。

5.2 中国彩色小麦种质资源在生物强化和功能食品应用中的研究进展

山西省农业科学院孙善澄是我国彩色小麦育种和产业化带头人之一,其培育的黑小麦 76 和普通小麦相比,硒和钙含量均高出 3 倍,蛋白质含量高出 1 倍,氨基酸含量高出 27%,且人体不可缺少的 8 种氨基酸含量较高。研究表明,黑粒小麦里的钙、铁、锌在动物里的吸收率高,在肝脏、血浆、骨骼和盲肠壁中的分布量高^[38],说明黑粒小麦的微量营养更容易被动物吸收。

河北省农林科学院李杏普课题组在我国较早地开展了彩色小麦种质资源研究,通过对来自 6 种不同籽粒色素基因遗传背景的 15 份蓝粒和紫粒小麦籽粒品质分析,结果表明,无论色素基因是来源于哪种类型,蓝、紫籽粒的蛋白质含量和赖氨酸含量均显著高于白粒普通小麦,属于高营养食品。来源于埃塞俄比亚地方品种的紫粒小麦的钙含量比普通小麦高。除了漂珍 1 号品种,其他色素籽粒资源的籽粒全磷含量均显著高于白粒普通小麦品种冀麦 36。来源于黑麦和埃塞俄比亚地方品种的两类型的彩色小麦种质资源,其籽粒的铜、铁、锰、锌 4 种有色微量元

素含量均高于白粒对照^[39]。李杏普课题组培育的 03Z4-439 黑小麦,经农业部谷物品质监督检验测试中心检测表明,有机铬(三价铬)含量为 1.916 mg/kg,超过普通白小麦约 4 倍,食用后能有效降低糖尿病人的血糖^[40]。富铬黑小麦含丰富的有机铬、硒、锌、膳食纤维、蛋白质,花青苷含量是普通小麦的 4~6 倍。该课题组联合北京北卫药业有限责任公司,利用冀紫 439 研发有益于糖尿病人的保健食品等。该课题组完成的“黑粒小麦种质创新与食药两用新品种培育及利用”项目获得了 2020 年度河北省科学技术进步奖二等奖。

何一哲课题组培育的高铁锌小麦秦黑 1 号微量营养元素铁、锌含量分别高达 749 mg/kg 和 135 mg/kg,是普通小麦的 19.2 倍和 4.1 倍,是一般黑小麦的 10.6 倍和 4.9 倍;其锰、铜、硒、镁、钾、磷等矿质元素含量和赖氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、谷氨酸等 18 种氨基酸含量总和均高于普通小麦,并具有低钠、低脂肪的特性^[41]。该课题组完成的“彩色小麦产业融合创新发展”项目获得了 2019 年度陕西省科技发明奖二等奖。

河南省漯河农科所培育的漂珍 1 号黑小麦,蛋白质和脂类含量比对照濮阳小麦分别高 23.26% 和 11.26%,氨基酸比对照高 23% 左右;矿质元素镁、硒、碘、锰比对照分别高 796.15%、533.133%、61.94% 和 61.46%^[42]。

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心张正斌课题组利用普通小麦和野生一粒小麦、二倍体黑麦远缘杂交培育出了 20 多个紫优小麦品系。营养成分研究表明,紫优小麦系列富含花青素、蛋白质、脂肪、不溶性膳食纤维、氨基酸(胱氨酸、苯丙氨酸和脯氨酸)、维生素(B1、B2、C)、微量元素(铁、铜、钙、锌、硒、铬等),具有强化营养和保健功能,营养品质价值高于普通小麦品种。紫小麦中钠和锰含量分别高于国家小麦粉标准的 311.77%~2017.65% 和 548.15%~733.33%;维生素 E 含量高于标准的 300%;锌、铁、镁和钾均比对照品种石家庄 8 号高 100%。因此,紫小麦在营养含量上比普通小麦有明显的优势^[10]。该系列品系既可以作为冬小麦进行秋播,也可以作为春小麦在春季播种,有很好的生态适应性。目前已经在河北、河南、山东、内蒙古等地作为特色小麦种植和开发利用,初步开发出富硒小麦面粉、紫麦酒、紫麦蛋糕、月饼、面包片、挂面、饺子等功能营养食品,紫优香牌面粉获“中国绿色健康名优产品”。天津生命医学科

技术有限公司从紫小麦中提取的多肽和制成的 DNA 修复剂,被安徽精诚徽药药业股份有限公司作为脑力静胶囊和糖浆的原料,这是功能营养农业的一个发展新方向。紫优 5 号在河北省栾城区的产业化发展成为当地乡村振兴的样板;紫优 5 号和紫优 11 号表现耐盐碱耐旱,被中国科学院海岸带研究所引种到山东东营国家农业高新技术示范区进行黄河三角洲盐碱地治理。

5.3 彩色小麦花青素营养功能研究进展

彩色小麦和普通白粒小麦的主要区别是含有大量的花青素。花青素是植物界中最大的一类水溶性色素,属于类黄酮化合物家族。研究表明,花青素具有广泛的生物活性,包括抗氧化、消炎、抗菌和抗癌活性。花青素除了对血管、血小板和脂蛋白有作用,还能够降低冠心病的风险^[43]。

彩色小麦面粉和其麦草汁提取物中花青素含量和抗氧化能力明显高于白粒小麦面粉和其麦草汁提取物。超高效液相色谱法显示黑小麦花青素峰值最大,其中飞燕草素-3-O-半乳糖苷、飞燕草素-3-O-糖苷和矢车菊素-3-O-糖苷是主要组分。黑小麦面粉提取物中花青素含量最高,对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、大肠埃希菌和白色念珠菌的抑制作用最大;对大肠杆菌和白色念珠菌的最低杀菌浓度为 200 mg/mL;对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的最低杀菌浓度为 100 mg/mL 和 150 mg/mL。黑、紫两种面粉提取物抗金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌均表现出最低抑菌浓度 50 mg/mL。白面粉提取物对大肠杆菌和白念珠菌没有显示最低杀菌浓度。黑麦草汁提取物中对所有病原体最低抑菌浓度为 100~150 mg/mL;对金黄色葡萄球菌和绿脓杆菌的最低杀菌浓度为 200 mg/mL。因此,富含花青素的彩色小麦在抗菌功能食品中具有重要的营养价值^[44]。

许多亚洲国家都食用小麦薄煎饼。生物强化的彩色小麦薄煎饼和面粉有更高的膳食纤维、蛋白质含量,碳水化合物含量较低。高可溶性和不溶性酚类化合物、花青素含量、抗氧化活性的含量高低顺序为黑粒>蓝粒>紫粒>白粒。与面粉相比,薄煎饼制作过程中减少了谷物的抗氧化活性成分和花青素含量,但抗氧化活性成分的减少程度比花青素含量低。因此,彩色小麦可以替代白粒小麦制作薄煎饼,有额外的健康促进活性^[45]。

Butelli 等^[46]报道,将金鱼草控制花青素的相关基因转移到番茄中,培育出了转基因紫色番茄,该番

茄的抗氧化剂含量远远高于其他番茄。用该番茄喂养携带高风险癌症因子的小鼠,小鼠的寿命明显延长。Peng 等^[47]发现与食用色素蓝 1 号类似的物质亮蓝 G (BBG, brilliant blue G) 能够保护脊髓受伤的哺乳动物的神经系统。在脊髓受伤 15 min 后施用 BBG,能够防止小鼠的炎症并促进自愈合过程。研究表明,花青素能保护人类免受各种疾病的侵袭,对人的健康具有重要意义。因此,选育富含花青素的彩色小麦品种对人类健康意义重大。

Zhang^[48]提出,要关注和发掘黑米对营养健康和粮食安全的重大潜在价值。基于动物模型的研究表明,黑米水溶性提取物(含花青素和其他花色苷)对多种非传染性疾病包括癌症、心血管疾病、糖尿病和代谢综合征等具有防治作用。除色素外,种皮还含有膳食纤维及其他营养物质,糊粉层富含蛋白质、不饱和脂肪酸、维生素、矿物质,胚含有多糖及其他生物活性物质。人们食用的精米只有胚和胚乳,其成分主要为淀粉及少量的蛋白质。因此他主张应该努力实现“主食全谷化”,尤其是“黑米主食化”,才能最大限度地获得稻米的营养物质,发挥其健康效益。这为彩色小麦主食化起到推动作用。

5.4 彩色小麦营养成分关联分析研究进展

国内外有关彩色小麦营养成分之间的相关分析和遗传规律研究少见报道。张正斌课题组利用 7 个紫优小麦品系的营养成分进行相关分析,研究结果表明,蛋白质和谷氨酸、钼元素、脯氨酸、铁元素、酪氨酸、异亮氨酸、花青素 7 种营养物质显著相关;花青素和钼元素、谷氨酸显著正相关,和钙元素显著负相关;铁元素和酪氨酸、谷氨酸、异亮氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸 5 种水解氨基酸显著相关;维生素 B1 和 12 种水解氨基酸显著相关;锌元素和 11 种水解氨基酸显著相关^[10]。这是国内外有关彩色小麦营养成分相关分析的首次报道,为彩色小麦营养品质遗传育种提供了重要信息。

四川农业大学蒲志恩团队报道,在 6 种主要农作物 18 个不同颜色品种中,水稻硒和花青素的平均浓度最高(1.41 mg/kg、43.48 mg/100 g),其次是小麦(0.11 mg/kg、20.51 mg/100 g)和大麦(0.03 mg/kg、0.43 mg/100 g)。6 种作物的彩色品种可食性部分均表现出硒与花青素含量高于白皮品种的现象,说明彩色作物品种的硒含量较高可能是普遍现象。在不同浓度的硒处理条件下,无论是水稻还是小麦,花青素含量高的品系,其硒吸收效率在同一物种中也较高,颜色最浅的白色小麦品种的硒吸收效率最低。

硒不仅对花青素含量产生正向影响,还影响不同类型花青素的积累,其中芍药色素的合成显著受到硒的影响。说明施硒可以同时提高水稻和小麦的花青素和硒含量,其中彩色水稻和小麦有更高的硒吸收效率^[49]。

通过2年的土壤施硒肥和叶面喷硒试验,紫粒小麦202W17在地上部和籽粒中积累的硒量高于白粒小麦山农129^[50],籽粒总蛋白、游离氨基酸和花青素含量也高于山农129。在紫粒小麦202W17中,叶面喷硒显著增加了锌、钙、镁含量,显著降低了铬、镉和铅含量,增施硒肥可以减少重金属污染,这对彩色富硒小麦功能食品产业化具有重要意义。土壤施硒肥促进了植株的生长,提高了紫粒和白粒小麦的产量。

施用硒矿粉可提高小麦产量及其产量构成要素(生物量、收获指数、粒数和千粒重)。小麦籽粒中锌、铁、锰、总硒和有机硒的浓度也有所增加,铜含量有所降低。小麦籽粒中砷、汞、铬、铅含量均低于硒矿粉在土壤中应用的标准限值。与对照白粒小麦相比,黑粒小麦在籽粒和地上部的锌、铁、锰浓度显著升高,积累的硒也较多,在根部积累的硒较少^[51]。所以黑粒小麦籽粒的微量营养成分含量高,可以开发为功能食品。

近30年来,国内外对彩色小麦种质资源创新与利用逐渐重视,许多研究表明,彩色小麦不但富含花青素,而且锌、硒、铁、铬、维生素、叶酸、氨基酸等微量营养成分含量也高,部分彩色小麦蛋白质含量也高,是功能营养优质小麦种质资源;通过营养干预和深入研究,证明它们在抗氧化、抗炎症、糖尿病、心血管、贫血病、生长发育疾病等方面都有一定的营养食疗功能^[52]。

6 彩色小麦种质资源粒色和营养遗传调控机理研究进展

6.1 彩色小麦起源和粒色发育组织器官研究进展

埃塞俄比亚是小麦起源中心之一,历史上有四倍体紫麦种质资源。1938年部分中国小麦品系被送到法国,其中Purple Anking和Red Hankou为紫粒小麦,前者与加拿大品种Manitoba杂交,培育出紫粒品系Red Fife^[53]。通过小麦远缘杂交,我国利用赖草与非紫粒普通小麦品种杂交获得了1个内蒙古紫粒小麦^[54]。彩色小麦种质资源主要分为紫粒和蓝粒两大类。紫粒小麦的颜色由种皮决定,种皮由亲代的母本珠被细胞发育而来,为母性遗传,其

色素基因主要来源于二粒小麦、埃塞俄比亚四倍体小麦、赖草、偃麦草等。蓝粒小麦颜色由糊粉层决定,为花粉直感效应,其色素基因主要来自偃麦草和一粒小麦等^[55-56]。黑粒小麦多为蓝粒和紫粒小麦的杂交或者回交后代,其种皮为紫色,糊粉层为蓝色^[57]。

6.2 彩色小麦粒色遗传规律和基因定位及分子标记定位研究进展

有关彩色小麦籽粒颜色的遗传规律,国内外有许多研究。邵中子等^[58]研究表明,内蒙古紫粒小麦由1对显性基因控制,紫皮颜色的传递既不受环境条件影响,也不受不同杂交组合的影响。Sharman^[59]用白色硬粒小麦与埃塞俄比亚紫色小麦杂交,研究结果表明,紫粒受1个显性等位基因*P*决定。Piech等^[60]发现紫粒性状由位于3A和7B染色体上的2个相互独立的基因控制。Dobrovolskaya等^[61]利用含有*Pp3b*和*Pp3a*紫粒基因的紫粒小麦与非紫粒小麦N67杂交,发现紫粒基因为单基因显性,而*Pp3b*和*Pp3a*都在2A染色体着丝粒区域,因此他们可能是同一位点的不同等位基因。紫粒小麦与非紫粒小麦S29杂交后代F₂的分离率为9(紫色):7(非紫色),表明*Pp1*和*Pp3*两个显性基因存在互补作用,*Pp1*作为单基因在后代F₂受*Pp3*基因影响。*Pp1*基因定位于染色体7BL,距着丝粒约24 cM。*Pp1*基因与*Rc-1*(红色胚芽鞘)和*Pc*(紫色茎秆)基因非等位,*Pp*基因引起的颜色效应对收获前穗上籽粒发芽没有影响。漯珍1号的紫粒色素基因位于2A染色体短臂和3A染色体长臂上,是由两对独立的基因控制的,分别与SSR分子标记Xgwm4和Xgwm155紧密连锁^[53]。

一粒小麦(*Triticum boeoticum* L.)的4Abo染色体携带有蓝色糊粉层基因,与普通小麦及四倍体硬粒小麦4A染色体(4Abo)是非同源的^[62]。Kuspira等^[63]把来自一粒小麦的蓝粒基因命名为*Bk*。Knott^[64]、李振声等^[65]均在长穗偃麦草与普通小麦的杂交后代中获得了蓝粒小麦,发现同一基因控制的蓝粒可划分为深、中、浅3类,与基因累加效应有关,并证明长穗偃麦草的4E染色体携带有蓝色糊粉层基因。目前已经定位的小麦蓝色糊粉层基因有长穗偃麦草4E染色体的*Bal*基因和位于4A染色体长臂的*Ba2*基因,后者与SSR分子标记Xcdo1387-4A、Xmwig677-4A和Xbcd1092-4A紧密连锁。乌麦526的蓝色基因与位于4A染色体短臂上的Xgwm165紧密连锁^[53]。

张正斌课题组以优质麦品系 Y1642(普通小麦和偃麦草远缘杂交后代)为母本和一粒小麦、法国黑麦混合授粉杂交,结果表明杂交 F₁ 和高代 F₆ 中的蓝白粒同穗分离比例占比最高的 3 种分离比例都包括 11 蓝: 5 白、13 蓝: 3 白和 9 蓝: 7 白。在杂交 F₁ 和高代 F₆ 中,蓝粒小麦的粒色遗传模式相同,主要表现为蓝粒色受两对互作的显性基因控制。杂交 F₁ 和高代 F₆ 中的蓝紫粒同穗分离比例中,占比最高的 2 种分离比例都包括 11 紫: 5 蓝和 9 紫: 7 蓝,紫粒色主要受两对显性基因的控制。蓝和紫粒小麦的粒色遗传模式具有稳定性^[66-67]。

同时,该课题组利用蓝和紫粒小麦杂交 F₂ 单株和单穗粒色遗传分离比例分析表明,紫粒属于母体遗传,蓝粒属于花粉直感遗传,但紫和蓝粒杂交后代中粒色还存在基因互作、基因剂量效应等复杂遗传效应。紫蓝粒同穗主要是受两对基因互作,基因间互作作用大小依次为抑制作用 > 互补作用 > 重叠作用。红蓝粒同穗主要是两对基因互作控制,其次是 1 对基因控制,再是 3 对基因互作控制;其中,两对基因互作类型作用大小依次是互补作用、抑制作用和重叠作用。红紫粒同穗、红白粒同穗、蓝白粒同穗都是由两对基因控制。各籽粒颜色间的显隐性关系是红粒对紫粒显性,红粒和紫粒对蓝粒显性,红粒、紫粒和蓝粒对白粒显性^[68]。

6.3 彩色小麦粒色基因克隆和差异表达及调控机理研究进展

二氢黄酮酮酸-4-还原酶(DFR, dihydro-flavonol-4-reductase)是花青素、原花青素和苯二酚生产上游类黄酮生物合成途径中的一个重要酶,参与植物各种组织的色素沉着。Eiko 等^[69]从六倍体小麦中分离到 3 个 DFRs 基因,与小麦红粒色基因 R 相比, TaDFRs 位点位于第 3 同源染色体组长臂的更近端, TaDFR-A、TaDFR-B 和 TaDFR-D 分别位于染色体 3A、3B 和 3D。在 DFR 基因的 5'端上游区域,发现 2~3 个 G box 核心元件组合和 1 个 Myb 型转录因子 P 的假定结合位点。在花后 5 d, DFR 基因在红粒小麦中表达量最高,而同期在白粒小麦籽粒表达量极低,花后 10~20 d 在中国春小麦(CS, Chinese Spring)白粒皮组织表达量逐渐降低。TaDFR-B 和 TaDFR-D 主要在籽粒中表达。在发育中的叶片中, TaDFR-B 的表达是光响应的,在叶片和根中的表达量高于其他两个基因的表达量,说明 DFR 基因是花青素合成上游调控途径的 1 个基因。TaDR 基因在蓝粒小麦中也被克隆^[70]。

ThMYC4E 中含有 1 个保守的 bHLH-MYC 结构域以及 HLH 和 ATC-like 结构域; TaMYC1 具有 1 个保守的 bHLH-MYC 和 HLH 的结构域; TaMYB7D 有 1 个 SANT(SWI3, ADA2, N-Co R and TFIIIB) DNA 结合结构域。TaMYB7D、ThMYC4E 和 TaMYC1 基因也参与调控彩色小麦花青素合成代谢^[71]。

TsMYC2 与调控花青素合成的 bHLH 转录因子同源,包含 3 个完整的功能域: bHLH-MYC_N、HLH 和 ACT-like, bHLH 转录因子对调控花青素生物合成具有重要作用。瞬时表达 ZmC1 和 TsMYC2 能诱导白小麦胚芽鞘细胞产生花青素,表明 TsMYC2 是 1 个能诱导白小麦胚芽鞘细胞产生花青素的功能性 bHLH 转录因子。该基因可用于培育具有蓝色糊粉特性的小黑麦新品种^[72]。

贵紫 1 号是我国贵州耐旱的紫色小麦地方品种。干旱胁迫下,检测到 379 个与防御反应相关的差异表达基因(DEGs),其中包括与防御响应有关的 DREBs 转录因子。大部分参与花青素生物合成的结构和调控基因表达水平平均下调,只有 TaDFR、TaOMT、Ta5、3GT 和 TaMYB-4B1 上调。TaCHS、TaF3H、TaCHI、Ta4CL 和 TaF3'H 参与对紫外线、激素和刺激响应; TaCHS-2D1、TaDFR-2D2、TaDFR-7D、TaOMT-5A、Ta5、3GT-1B1、Ta5、3GT-3、ATa5 和 3GT-7B1 连接花青素生物合成与其他途径,其互作蛋白参与初级代谢、遗传调控、生长发育、防御反应。贵紫 1 号在干旱胁迫下诱导生物和非生物胁迫响应基因,花青素的生物合成也参与了干旱防御反应^[73]。

为明确彩色作物硒吸收效率较高的分子遗传机理, Pu 等^[74]以彩色小麦和白皮小麦为材料,在外源喷硒条件下,利用转录组测序挖掘调控硒和花青素的关键因子。KEGG 富集分析表明,硒诱导上调表达的基因功能主要集中于苯丙氨酸生物合成、寿命调节和生物信号转导等,其中苯丙氨酸合成途径与花青素代谢途径密切相关,这一结果证明硒能够影响花青素合成途径;上调基因富集于与硫代谢途径相关的甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢途径以及谷胱甘肽代谢途径。分析不同颜色小麦品种硒处理后相关通路上调表达基因数量,发现转运因子和硫相关基因较多。转录组分析结果表明,在硒诱导下,同时存在花青素/硫代谢相关的基因富集现象,解释了彩色小麦富硒的可能原因。硒除了通过硫转录因子进行转运,也可以通过磷转运因子进入植物细胞。R2R3-MYB 和 bHLH 转录因子参与花青素的合成

途径,在磷代谢途径上可将硒与花青素关联起来。随后通过对硒处理后不同颜色小麦的差异表达基因进行筛选,RT-qPCR结果显示彩色小麦花青素合成的关键转录因子R2R3-MYB和bHLH在硒诱导下表达量较白色小麦显著提高,表明转录因子R2R3-MYB和bHLH家族或为硒与花青素的调控网络的共同调控因子。硫对小麦品质有重要作用,在小麦籽粒中低分子麦谷蛋白、 $\alpha+\beta$ -麦醇溶蛋白和 γ -麦醇溶蛋白是富硫蛋白^[75]。硒主要增加了低分子麦谷蛋白亚基的含量,不能提高 $\alpha+\beta$ -麦醇溶蛋白和 γ -麦醇溶蛋白的含量,表明硒与含硫的贮藏蛋白的流向并不完全一致。

植物生长素和细胞分裂素以拮抗的方式参与小麦紫粒发育过程中花青素的积累。与此同时,抗氧化酶中的过氧化物酶和过氧化氢酶含量与花青素积累速率的动态变化相一致,表明ROS信号参与了花青素积累的调控^[76]。

紫粒小麦品种具有最高的酚含量和抗氧化活性。在酚酸化合物中,紫粒小麦的结合阿魏酸、香草酸和咖啡酸水平明显高于白粒和红粒小麦,紫粒和红粒小麦总可溶性酚酸、可溶性阿魏酸和香草酸水平显著高于白粒小麦。9个酚酸生物合成途径基因(*TaPAL1*、*TaPAL2*、*TaC3H1*、*TaC3H2*、*TaC4H*、*Ta4CL1*、*Ta4CL2*、*TaCOMT1*、*TaCOMT2*) 在籽粒灌浆过程中表现为3种不同表达模式,白粒小麦在灌浆早期具有较高的酚酸含量和相对较高的基因表达,而紫粒小麦在灌浆后期具有最高的酚酸含量和基因表达水平^[77]。以上研究结果为彩色小麦花青素和微量营养(硒、硫)及品质性状(蛋白质和组分)遗传耦合机制研究提供了重要信息,为加快彩色功能营养小麦品种和产业化提供了理论基础和技术支撑。

7 展望

彩色小麦品种及种质资源的出现和产业化发展是作物及其种质资源与人文环境的协同演变^[78]。从国内外彩色小麦遗传育种的研究进展来看,国外在彩色小麦营养功能遗传调控方面有深入理论研究,处于领先地位。我国在彩色小麦育种和初级产业化方面有一定的优势,目前我国有60多个彩色小麦品种通过审定,在各地形成了一定规模的彩色小麦产品初加工产业化,已经有彩色小麦加工产品在市场销售,成为一些地区乡村振兴和农业结构调整的典型样板。

彩色小麦在产量方面和普通小麦没有显著差异,在营养品质方面高于普通小麦。在抗逆性方面有的彩色小麦品种好于普通小麦,因为富含花青素的彩色小麦品种抗氧化能力强,具有抗旱抗盐碱功能。高产、优质营养、粒色、抗病、抗逆性状由不同基因控制,并不相互矛盾,因此彩色功能营养小麦育种需加大遗传育种力量的投入,通过基因聚合育种培育出产量高、品种优、富含微量营养的彩色小麦新品种,实现营养高值与高产协同遗传改良。如同我国早期只重视高产小麦育种,没有重视优质小麦育种一样,20世纪80年代以前的小麦品种产量高但营养品质低;随着近20年来对小麦优质育种的重视,在高产广适亲本基础上,增加优质小麦亲本的遗传背景,已经培育出了既高产又优质的小麦品种。

从以上彩色小麦营养遗传研究进展来看,目前存在的问题是对彩色小麦花青素和微量营养及品质的遗传耦合机理研究少见报道。加强挖掘利用我国彩色小麦特色种质资源中的优异营养基因资源,广泛收集鉴定彩色小麦种质资源,利用远缘杂交育种等技术创制彩色功能营养小麦新种质,利用不同遗传背景的彩色小麦种质资源和杂交后代,通过遗传相关和数量遗传模型分析及分子生物学研究,揭示彩色小麦花青素和微量营养(硒、锌、铬等微量元素,维生素,人体不能合成的8种氨基酸,叶酸等)和品质(蛋白质含量和组分)性状的遗传耦合机理,将成为彩色功能营养小麦育种研究的重点方向。

彩色小麦产业化开发利用缓慢是当前存在的主要问题,一是人们对彩色小麦的营养功能不是十分了解,有待于加大科普宣传;二是彩色小麦食品深加工产业化规模小,尚未实现优质功能营养小麦食品高价值,没有成为主食,还需要各级政府加大科技和产业化投资;三是利用彩色小麦特殊营养成分开发特殊医学食品是生物医学的发展方向,需要彩色小麦遗传育种研究和生物制药企业和临床医学紧密结合,实现跨学科交叉发展,才能加快彩色小麦的高端开发和利用。

《“健康中国2030”规划纲要》中明确提出,要推进健康饮食文化建设,必须关口前移,对重点区域、重点人群实施营养干预。这样既可以解决营养元素缺乏的问题,也能防止高油脂、高糖等问题^[79],这正是发展功能营养彩色小麦的机遇。我国人民群众正在经历从吃饱到吃好再到吃出健康的历史阶段。小麦和水稻是我国的主要粮食作物,主食功能

化和功能化主食产业化发展已经成为世界食品产业的发展趋势。彩色小麦种质资源富含花青素、硒、锌、铁、铬、维生素、叶酸等微量营养以及蛋白质、膳食纤维等对人体功能调节的营养物质,应该加强生物强化功能彩色小麦品种遗传育种研究,加大彩色小麦功能食品的研发,加快彩色小麦功能营养食品的产业化,消减隐性饥饿;让健康来自于食品而不是药品,让健康来自于农田而不是药房;这是解决当前群众健康问题的现实途径,是落实健康中国战略的重要举措。

参考文献

- [1] 何中虎, 庄巧生, 程顺和, 于振文, 赵振东, 刘旭. 中国小麦产业发展与科技进步. 农学学报, 2018, 8(1): 99-106
He Z H, Zhuang Q S, Cheng S H, Yu Z W, Zhao Z D, Liu X. Wheat production and technology improvement in China. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 99-106
- [2] 健康中国行动推进委员会. 健康中国行动(2019-2030年). (2019-07-17) [2022-03-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/15/content_5409694.htm
Healthy China Action Promotion Committee. *Healthy China action* (2019-2030). (2019-07-17) [2022-03-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/15/content_5409694.htm
- [3] Erin M, Mary C, Ines E, Daniel W, Bruno D B. Worldwide prevalence of anaemia, WHO vitamin and mineral nutrition information system, 1993-2005. *Public Health Nutrition*, 2008, 12(4): 444-454
- [4] Jorge E M, Wolfgang H P, Peter B. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. *Current Opinion in Plant Biology*, 2008, 11: 166-170
- [5] 田纪春, 胥倩. 功能性小麦品种的概念、类别和发展前景. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 1-8
Tian J C, Xu Q. Concept, category and development prospect of functional wheat varieties. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(2): 1-8
- [6] Powell K. Functional foods from biotech-an unappetizing prospect? *Nature Biotechnology*, 2007, 25: 525-531
- [7] 何一哲, 宁军芬, 郭仲民, 赵晖. 中国发展生物强化功能食品的机会与挑战. 世界农业, 2008, 5: 53-56
He Y Z, Ning J F, Guo Z M, Zhao H. Opportunities and challenges in the development of biofortified functional foods in China. *World Agriculture*, 2008, 5: 53-56
- [8] 鸿涛. 主食芯片: 食物的未来是多功能主食. 北京: 中国商业出版社, 2019: 11-20
Hong T. *Staple chip: The future of food is multi-functional staple food*. Beijing: China Commercial Press, 2019: 11-20
- [9] 徐萍, 张正斌, 郭自峰. 生物强化育种与彩色小麦的开发利用 // 中国植物学会. 第二届全国种子科学与技术学术研讨会论文集. 长沙: 第二届全国种子科学与技术学术研讨会, 2011: 45
Xu P, Zhang Z B, Guo Z F. Biofortified breeding and development and utilization of colored wheat // *Botanical Society of China. Proceedings of the Second National Symposium on Seed Science and Technology*. Changsha: The second national symposium on seed science and technology, 2011: 45
- [10] Guo Z F, Zhang Z B, Xu P, Guo Y N. Analysis of nutrient compositions of purple wheats in China. *Cereal Research Communications*, 2013, 41(2): 293-303
- [11] 郭海英. 我们为什么关注“隐性饥饿”. 北京青年报. (2019-10-20) [2022-03-12]. http://epaper.yynet.com/html/2019-10/20/content_339704.htm?div=-1
Guo H Y. Why do we pay attention to “hidden hunger”. *Beijing Youth Daily*. (2019-10-20) [2022-03-12]. http://epaper.yynet.com/html/2019-10/20/content_339704.htm?div=-1
- [12] Biesalski H K. *Hidden hunger*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 245-300
- [13] 吕爱清, 罗天相, 刘沐生. 隐性饥饿的研究现状与应对策略. 中国食物与营养, 2017, 23(6): 5-8
Lv A Q, Luo T X, Liu M S. Research advancements and coping strategies on hidden hunger. *Food and Nutrition in China*, 2017, 23(6): 5-8
- [14] Miguel I G, Christopher B B, Terri R, Per P A, Janice M, Aandre C, Brian C, Brina T. Post-green revolution food systems and the triple burden of malnutrition. *Food Policy*, 2013, 42: 129-138
- [15] 孙静, 霍军生, 李文仙, 王丽娟, 黄建, 李志强, 万丽萍. 营养强化面粉改善西部农村妇女营养状况研究. 中国食品卫生杂志, 2008, 20(2): 117-120
Sun J, Huo J S, Li W X, Wang L J, Huang J, Li Z Q, Wan L P. Study on effectiveness of nutrition intervention of fortified flour on rural women in western China. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2008, 20(2): 117-120
- [16] 李雪梅, 董振军, 李书国, 陈辉. 我国营养强化面粉研究发展现状及对策. 食品科学, 2005, 26: 102-105
Li X M, Dong Z J, Li S G, Chen H. Study on the status and key technology of nutritional fortification of flour in China. *Food Science*, 2005, 26: 102-105
- [17] Howarth E B, Ross M W. Biofortification-a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science*, 2010, 50: 20-32
- [18] Banuelos G S, Lin Z Q. *Development and uses of biofortified agricultural products*. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 2008
- [19] Forssard E, Bucher M, Machler F, Mozafar A, Hurrell R. Potential for increasing the content and bio-availability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80: 861-879
- [20] Velu G, Singh R P, Crespo H L, Juliana P, Dreisigacker S, Valluru R, Staangoulis J, Sohu V S, Mavi G S, Mishra V K, Balasubramaniam A, Chatrath R, Gupya V, Singh G P, Joshi A K. Genetic dissection of grain zinc concentration in spring wheat for mainstreaming biofortification in CIMMYT wheat breeding. *Science Report*, 2018, 8: 13526
- [21] Cristobal U, Assaf D, Tzion F, Ann B, Jorge D. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. *Science*, 2006, 314: 1298
- [22] Rawat N, Tiwari V K, Sinng N, Randhwa G S, Singh K, Chhune P, Dhaliwal H S. Evaluation and utilization of *Aegilops* and wild *Triticum* species for enhancing iron and zinc content in wheat. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2009, 56: 53-64
- [23] 范云六, 万建民, 雷新根. 中国生物强化项目进展. 中国农业科技导报, 2009, 11(1): 1-6

- Fan Y L, Wan J M, Lei X G. Progress of harvest plus China program. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2009, 11 (1): 1-6
- [24] 赵芑, 郭斐, 董笑晨, 卞祺, 于跃波, 姜玉杰. 全谷物食品行业概况和发展趋势. *现代食品*, 2018, 15: 8-12
Zhao P, Guo F, Dong X C, Bian Q, Yu Y B, Jiang Y J. Overview and development trend of whole grain food industry. *Modern Food*, 2018, 15: 8-12
- [25] 新华网. 八机构联合发布全谷物与健康科学共识. (2021-05-31) [2022-03-12]. http://www.xinhuanet.com/food/2021-05/31/c_1127513517.htm
Xinhuanet. Eight agencies jointly issued a scientific consensus on whole grains and health. (2021-05-31) [2022-03-12]. http://www.xinhuanet.com/food/2021-05/31/c_1127513517.htm
- [26] 陆勤丰. 面粉营养强化关键技术及制品安全性. *食品工业科技*, 2008 (5): 269-272, 274
Lu Q F. Key technology of flour nutrition fortification and product safety. *Science and Technology of Food Industry*, 2008 (5): 269-272, 274
- [27] 丁文平. 小麦加工过程中的营养损失与面粉的营养强化. *粮油加工*, 2008, 5: 87-89
Ding W P. Nutrient loss in wheat processing and nutrient fortification of flour. *Grain and Oil Processing*, 2008, 5: 87-89
- [28] 中华人民共和国农业农村部. 农业部关于加强粮食加工减损工作的通知. (2014-07-07) [2022-03-12]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2014/dbq/201712/t20171219_6110661.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular of the ministry of agriculture on strengthening the work of reducing losses in grain processing. (2014-07-07) [2022-03-12]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2014/dbq/201712/t20171219_6110661.htm
- [29] Gaesser G A. Whole grains, refined grains, and cancer risk: A systematic review of meta-analyses of observational studies. *Nutrients*, 2020, 12: 3756
- [30] 中国营养学会. 营养科学词典. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 166-240
Chinese Nutrition Society. Dictionary of nutrition science. Beijing: China Light Industry Press, 2013: 166-240
- [31] 郑建仙. 功能性食品. 北京: 中国轻工业出版社, 1995: 8-20
Zheng J X. Functional food. Beijing: China Light Industry Press, 1995: 8-20
- [32] Ruel M T, Alderman H. Nutrition-sensitive interventions and programmes: How call they help to accelerate progress in improving maternal and child nutrition? *Lancet*, 2013, 382 (9891): 536-551
- [33] 卢士军, 黄家章, 吴鸣, 沈东婧, 孙君茂. 营养导向型农业的概念、发展与启示. *中国农业科学*, 2019, 52 (18): 3083-3088
Lu S J, Huang J Z, Wu M, Shen D J, Sun J M. The concept and development of nutrition-sensitive agriculture and its enlightenments to China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (18): 3083-3088
- [34] 中国科学院农业领域战略研究组. 中国至 2050 年农业科技发展路线. 北京: 科学出版社, 2009: 9-18
The Group of Strategic Studies in Agriculture, Chinese Academy of Sciences. Science and technology and China's future: The development path of agricultural science and technology in China to 2050. Beijing: Science Press, 2009: 9-18
- [35] 张肇富. 美国培育出高蛋白质紫小麦. *食品科学*, 2005, 26 (8): 25
Zhang Z F. The United States breed high protein purple wheat. *Food Science*, 2005, 26 (8): 25
- [36] 加拿大国际广播电台. 加拿大紫色小麦可能成为受青睐健康食品. (2020-12-28) [2022-03-12]. http://www.58winnipeg.com/article/article_43713.html
Radio Canada International. Canadian purple wheat may become a favored healthy food. (2020-12-28) [2022-03-12]. http://www.58winnipeg.com/article/article_43713.html
- [37] Sharm S, Khare P, Kuar A, Chunduri V, Kumar A, Kapoor P, Mangal P, Kiran K K, Bishnoi M, Garg M. Anthocyanin-biofortified colored wheat prevents high fat diet-induced alterations in mice: Nutrigenomics studies. *Molecular Nutrition Food Research*, 2020, <https://doi.org/10.1002/mnfr.202070030>
- [38] 孙善澄. 黑粒高营养小麦种植与加工利用. 北京: 金盾出版社, 2003: 5-25
Sun S C. Black grain high nutrition wheat planting and processing and utilization. Beijing: Golden Shield Press, 2003: 5-25
- [39] 李杏普, 侯红军, 刘玉平, 兰素缺, 祝玉英. 蓝、紫粒小麦的营养品质研究. *华北农学报*, 2002, 17 (1): 21-24
Li X P, Hou H J, Liu Y P, Lan S Q, Zhu Y Y. Studies of grain nutritional quality of wheat with blue or purple kernels. *Acta Agriculturae Boreali-Sonica*, 2002, 17 (1): 21-24
- [40] 河北省农林科学院粮油作物研究所. 富铬优质黑小麦特异种质. *中国农业科学*, 2005, 12: 55
Institute of Grain and Oil Crops of Hebei Academy of Agriculture and Forestry. Special black wheat germplasm of rich chromium and good quality. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 12: 55
- [41] 何一哲, 宁军芬. 高铁锌小麦特异新种质“秦黑 1 号”的营养成分分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 31 (3): 87-90
He Y Z, Ning J F. Analysis of nutrition composition in the special purple grain wheat “QinheiNo.1” containing high Fe and Zn. *Journal of Northwest Science-Technology University of Agricultural and Forest: Nature Science Edition*, 2003, 31 (3): 87-90
- [42] 苏东民, 刘兵建, 赵仁勇, 林江涛, 李建钊. 漯珍 1 号黑小麦营养成分的初步分析. *粮食与饲料工业*. 2000, 8: 1-2
Su D M, Liu B J, Zhao R Y, Lin J T, Li J Z. Preliminary evaluation for nutritional compositions of black wheat Luozhen No.1. *Food and Feed Industry*, 2000, 8: 1-2
- [43] Mazza G. Anthocyanins and heart health. *Annali Dell Istituto Superiore Di Sanita*, 2007, 43 (4): 369-374
- [44] Sharm N, Tiwari V, Vats S, Kumari A, Chunduri V, Kaur S, Kappoor P, Garg M. Evaluation of anthocyanin content, antioxidant potential and antimicrobial activity of black, purple and blue colored wheat flour and wheat-grass juice against common human pathogens. *Molecules*, 2020, 25: 5785
- [45] Kumari A, Sharma S, Sharma N, Chunduri V, Kapoor P, Kaur S, Goyal A, Garg M. Influence of biofortified colored wheats (purple, blue, black) on physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of chapatti (indian flatbread). *Molecules*, 2020, 25: 5071
- [46] Butelli E, Titta L, Giorgio M, Mock H P, Matros A,

- Reterek S, Schijlen E G W M, Hall R D, Bovy A G, Luo J, Martin C. Enrichment of tomato fruit with health-promoting anthocyanins by expression of select transcription factors. *Nature Biotechnology*, 2008, 26: 1301-1308
- [47] Peng W G, Maria L C, Hanh X N, Yu H M, Bekar L, Blum L, Takano T, Tian G F, Goldman S A, Nedergaard M. Systemic administration of an antagonist of the ATP-sensitive receptor P2X7 improves recovery after spinal cord injury. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(30): 12489-12493
- [48] Zhang Q F. Purple tomatoes, black rice and food security. *Nature Review Genetics*, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00359-3>
- [49] Pu Z E, Wei G H, Liu Z H, Chen L, Guo H, Li Y, Li Y, Dai S F, Wang J R, Li W, Jiang Q T, Wei Y M, Zheng Y L. Selenium and anthocyanins share the same transcription factors R2R3-MYB and bHLH in wheat. *Food Chemistry*, 2021, DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129699
- [50] Xia Q, Yang Z P, Shui Y, Liu X L, Chen J, Khan S, Wang J M, Gao Z Q. Methods of selenium application differentially modulate plant growth, selenium accumulation and speciation, protein, anthocyanins and concentrations of mineral elements in purple-grained wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 1114
- [51] Liu Y X, Huang S H, Jing Z H, Wang Y Z, Zhang Z M. Selenium biofortification modulates plant growth, microelement and heavy metal concentrations, selenium uptake, and accumulation in black-grained wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 748523
- [52] Saini P, Kumar N, Kumar S, Mwaurah P, Singh V. Bioactive compounds, nutritional benefits and food applications of colored wheat: A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793727>
- [53] 白冬梅, 白云凤, 黄晋玲. 我国黑粒小麦籽粒色素基因的研究进展. *陕西农业科学*, 2007, 1: 69-72
Bai D M, Bai Y F, Huang J L. The research progress of seed pigment gene in Chinese black grain wheat. *Shaanxi Agricultural Science*, 2007, 1: 69-72
- [54] Zeven A C. Wheats with purple and blue grains: A review. *Euphytica*, 1991, 56: 243-258
- [55] 张正斌. 小麦遗传学. 北京: 中国农业出版社, 2001: 90-105
Zhang Z B. *Wheat genetics*. Beijing: China Agricultural Press, 2001: 90-105
- [56] 蒋勃, 张淑欣, 王惠, 史玥, 李紫琪, 朱蕾, 宋维富, 杨雪峰, 宋庆杰, 李新玲, 张延明. 中间偃麦草种质改良及基因组育种研究进展. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(6): 1385-1394
Jiang B, Zhang S X, Wang H, Shi Y, Li Z Q, Zhu L, Song W F, Yang X F, Song Q J, Li X L, Zhang Y M. Genetic improvement and genomics-assisted breeding of the germplasm resource *Thinopyrum intermedium*. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(6): 1385-1394
- [57] Bohmdorfer S, Oberlerchner J T, Fuchs C, Rosenau T, Grausgruber H. Profiling and quantification of grain anthocyanins in purple pericarp × blue aleurone wheat crosses by high-performance thin-layer chromatography and densitometry. *Plant Methods*, 2018, 14: 29
- [58] 邵中子, 邓景扬. 内蒙古紫皮小麦紫皮性状的遗传分析. *遗传学报*, 1987, 14(3): 179-187
Shao Z Z, Deng J Y. Genetic analyses of the purple character in Inner Mongolia purple seed-coat wheat. *Acta Genetica Sinica*, 1987, 14(3): 179-187
- [59] Sharman D C. Purple pericarp: A monofactorial dominant in tetraploid wheat. *Nature*, 1958, 4613: 929
- [60] Piech J, Evans L E. Monosomic analysis of purple grain colour in hexaploid wheat. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, 1979, 82: 212-217
- [61] Dobrovolskaya O, Arbuzova V S, Lohwasser U, Roder M S, Borner A. Microsatellite mapping of complementary genes for purple grain colour in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 2006, 150: 355-364
- [62] Joppa L R, Mann S S. A durum wheat disomic-substitution line having a pair of chromosomes from triticum boeoticum: Effect on germination and growth. *Genome*, 2011, 24(5): 549-557
- [63] Kuspira J, Maclagan J, Bhambhani R N, Sadasivaiah R S, Kim N S. Genetic and cytogenetic analysis of the A genome of *Triticum monococcum* L.V. Inheritance and linkage relationships of genes determining the expression of 12 qualitative characters. *Genome*, 1989, 32: 869-881
- [64] Knott D R. The inheritance in wheat of a blue endosperm color derived from *Agropyron elongatum*. *Canadian Journal of Botany*, 1958, 36(5): 571-574
- [65] 李振声, 穆素梅, 蒋立训, 周汉平, 吴景科, 余玲. 蓝粒单体小麦研究(一). *遗传学报*, 1982, 9(6): 431-439
Li Z S, Mu S M, Jiang L X, Zhou H P, Wu J K, Yu L. A study on blue-grained monosomic wheat(I). *Acta Genetica Sinica*, 1982, 9(6): 431-439
- [66] Guo Z F, Xu P, Zhang Z B, Guo Y N. Segregation ratios of colored grains in F₁ hybrid wheat. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2012, 12: 126-131
- [67] Guo Z F, Xu P, Zhang Z B, Wang D W, Miao J, Teng A P. Segregation ratios of colored grains in crossed wheat. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(5): 589-594
- [68] 何秀平, 张正斌, 徐萍, 杨引福. 彩色小麦 F₂ 代种皮颜色遗传规律分析. *西北农业学报*, 2013, 22(9): 35-40
He X P, Zhang Z B, Xu P, Yang Y F. Seed coat color inheritance analysis of colored grain wheat in F₂ generation. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(9): 35-40
- [69] Eiko H, Kazuhiko N. Isolation and location of three homoeologous dihydro-avonol-4-reductase (DFR) genes of wheat and their tissue-dependent expression. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 396(55): 365-375
- [70] Yang G H, Zhao X Q, Li B, Liu J Z, Zheng Q, Tong Y P, Li Z S. Molecular cloning and characterization of a DFR from developing seeds of blue-grained wheat in anthocyanin biosynthetic pathway. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2003, 45(11): 1329-1338
- [71] 叶琳. 彩色小麦营养成分及其色素基因表达模式的研究. 西宁: 青海师范大学, 2015
Ye L. Study on nutrient components and expression patterns of pigment genes in color wheat. Xining: Qinghai Normal University, 2015

- [72] Zong Y, Li G, Xi X Y, Sun X M, Li S M, Cao D, Zhang H G, Liu B L. A bHLH transcription factor TsMYC2 is associated with the blue grain character in triticale (*Triticum* × *Secale*). *Plant Cell Reports*, 2019, 38: 1291-1298
- [73] Li X L, Lu X, Wang X H, Peng Q, Zhang M S, Ren M J. Biotic and abiotic stress-responsive genes are stimulated to resist drought stress in purple wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(1): 33-50
- [74] Pu Z E, Wei G H, Liu Z H, Chen L, Guo H, Li Y, Li Y, Dai S F, Wang J R, Li W, Jiang Q T, Wei Y M, Zheng Y L. Selenium and anthocyanins share the same transcription factors R2R3MYB and bHLH in wheat. *Food Chemistry*, 2021, 356(15): 129699
- [75] Zhao F J, Salmon S E, Withers P J A, Monaghan J M, Evans E J, Shewry P R, Mcgrath S P. Variation in the bread making quality and rheological properties of wheat in relation to sulfur nutrition under field conditions. *Journal of Cereal Science*, 1999, 30: 19-31
- [76] Li L H, Yang G P, Ren M J, Wang Z N, Peng Y S, Xu R H. Co-regulation of auxin and cytokinin in anthocyanin accumulation during natural development of purple wheat grains. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40: 1881-1893
- [77] Ma D Y, Li Y G, Zhang J, Wang C Y, Qing H X, Ding H N, Xie Y X, Guo T C. Accumulation of phenolic compounds and expression profiles of phenolic acid biosynthesis-related genes in developing grains of white, purple, and red wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 528
- [78] 刘旭, 李立会, 黎裕, 谭光万, 周美亮. 作物及其种质资源与人文环境的协同演变学说. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(1): 1-11
- [79] Liu X, Li L H, Li Y, Tan G W, Zhou M L. Synergistic evolution theory of crop germplasm resources and cultural environments. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 1-11
- [79] 中共中央国务院. 《“健康中国 2030”规划纲要》. (2016-10-25) [2022-03-12]. http://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm
- The Central Committee of the Communist Party of China and The State Council. The outline of the healthy China 2030 plan. (2016-10-25) [2022-03-12]. http://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm

《植物遗传资源学报》2023 年征订启事

《植物遗传资源学报》是中国农业科学院作物科学研究所和中国农学会主办的学术期刊,中国科技核心期刊、全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊,被国内外多家数据库收录,被 CA 化学文摘(美)、JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)、CABI 收录,荣获 2015 年度中国自然资源学会高影响力十佳期刊,2017、2020 年连续入选中国精品科技期刊,入选《世界期刊影响力指数(WJCI)报告》。据《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2022 版)》统计,《植物遗传资源学报》2022 年复合影响因子为 2.914,期刊综合影响因子 2.177。

报道内容为有关植物遗传资源基础理论研究、应用研究方面的研究成果、创新性学术论文和高水平综述或评论。如种质资源的考察、收集、保存、评价、利用、创新,信息学、管理学等;起源、演化、分类等系统学;基因发掘、鉴定、克隆、基因文库建立、遗传多样性研究等。

双月刊,大 16 开本,320 页,彩色铜版纸印刷。定价 68 元,全年 408 元。各地邮局发行。邮发代号:82-643。国内统一连续出版物号 CN11-4996/S,国际标准连续出版物号 ISSN1672-1810。本刊编辑部常年办理订阅手续,如需邮挂每期另加 3 元。

地址:北京市中关村南大街 12 号《植物遗传资源学报》编辑部

邮编:100081 电话:010-82105794 010-82105795

网址:<https://www.zwyczy.cn>

E-mail: zwyczyxb2003@163.com zwyczyxb2003@sina.com

微信 ID: 植物遗传资源学报 作者 QQ1 群: 372958204

作者 QQ2 群: 1107885410