

有色大麦研究进展

华 为, 朱靖环, 尚 毅, 贾巧君, 汪军妹, 杨建明

(浙江省农业科学院作物与核技术利用研究所/国家大麦改良中心, 杭州 310021)

摘要: 有色大麦是一类珍贵的大麦种质资源, 主要由不同色素沉积在大麦种子的果皮和糊粉层内而形成。有色大麦富含天然色素, 人体必需氨基酸, 维生素和钙、硒等矿物质元素, 具有特殊的生理功能, 可作为生产营养保健品的原料, 也可作为食品添加剂用于食品加工, 还可用于化妆品行业制造防晒膏和染发剂等。有色大麦主要分蓝、紫和黑 3 种颜色, 不同颜色大麦的花色苷组成成分及含量有所不同。研究认为, 黑色大麦主要受显性基因 *Blp* 控制, 该基因位于染色体 1HL 上; 紫色大麦受 2 对显性互补基因控制 (*Pre1* 和 *Pre2*), 位于染色体 2HL 上, 而蓝色大麦由 5 对显性互补的等位基因控制 (*Blx1*、*Blx2*、*Blx3*、*Blx4* 和 *Blx5*), 分别位于染色体 4HL 和 7HL 上。

关键词: 有色大麦; 花色苷; 酚类; 品质; 遗传

Research Advances in Colored Barley

HUA Wei, ZHU Jing-huan, SHANG Yi,

JIA Qiao-Jun, WANG Jun-mei, YANG Jian-ming

(National Barley Improvement Center/Institute of Crops and Nuclear Technology
Utilization, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021)

Abstract: Colored barley is the type of precious barley germplasm resources. The color of its seeds is caused by the deposition of different pigments in pericarp and aleurone layer. Colored barley seeds contain many kinds of nutrient components such as natural pigments, essential amino acids, vitamins and mineral elements including calcium, selenium etc., which play important physiological roles in human health. The seeds of colored barley can be used as raw materials for producing nutraceuticals, food additives for the food processing industry, and they can also be used for manufacturing suntan cream and hair coloring agent in cosmetics industry. The colors of barley seeds are mainly blue, purple and black because of various components and contents of anthocyanins in them. Black barley is controlled by a dominant gene *Blp* located on chromosome 1HL; purple barley is controlled by two complementary dominant genes, *Pre1* and *Pre2*, both of them located on chromosome 2HL; blue barley is controlled by five complementary dominant genes, *Blx1*、*Blx2*、*Blx3*、*Blx4* and *Blx5*, among of them *Blx1*、*Blx3* and *Blx4* located on chromosome 4HL, *Blx2* and *Blx5* located on chromosome 7HL.

Key words: Colored barley; anthocyanin; phenolic compounds; quality; inheritance

大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 是世界上最古老作物之一, 其种植面积和产量仅次于水稻、玉米和小麦, 位于世界第 4 位。目前, 全球将近 75% 的大麦用于动物饲料, 20% 用于制造酒精和非酒精类饮品的原料, 5% 用于食品原料。大麦具有广泛的适应

性, 能在较恶劣的环境条件下生长, 在我国大麦还是西藏人民的主要食物来源^[1]。由于大麦子粒的化学组分 (比如膳食纤维、生育酚等) 不同于其他禾谷类作物, 大麦还可用于功能食品的开发^[2], 而有色大麦的花色苷、酚类化合物、蛋白质、人体必需氨基

收稿日期: 2013-03-06 修回日期: 2013-03-13 网络出版日期: 2013-10-22

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20131022.1543.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金 (31101149); 浙江省自然科学基金 (Y3110574); 浙江省公益性研究项目 (2012C22029); 国家大麦青稞产业技术体系 (CARS-05)

第一作者主要从事大麦遗传育种研究。E-mail: huaweicau@hotmail.com

通信作者: 杨建明, E-mail: jmyang@163.com

酸和微量元素等营养保健成分普遍高于普通大麦,因此对于有色大麦作为功能食品的开发越来越受到重视^[2-10]。本文介绍了有色大麦的划分标准,总结了有色大麦的品质特点及遗传方式,同时探讨了有色大麦的应用前景和存在的问题。

1 大麦子粒颜色的划分

大麦子粒颜色一般指大麦颖果的颜色,是由色素沉积在果皮和糊粉层中形成的^[11]。由于大麦子粒颜色丰富多彩,国外对于大麦子粒颜色的划分不尽相同,但主要分为黄(白)、蓝、紫(红)和黑4种颜色^[11,13-15],果皮和糊粉层中不含色素子粒为黄(白)色;糊粉层含花色苷而果皮不含色素,子粒显蓝色;糊粉层和果皮都含花色苷,子粒显紫色;果皮含黑色素,子粒显黑色^[11]。在我国,以前的大麦种质资源目录将子粒颜色分为淡黄、黄、黄褐、淡蓝、黄蓝、绿、蓝、灰、褐、黑褐、紫和黑12种颜色,这种分法虽然细致,但是颜色之间很难明确区分,实际工作中常引起不同的人将同一份材料划分为不同颜色的情况。2006年,由中国农业科学院作物科学研究所主持编写的《大麦种质资源描述规范和数据标准》一书中将大麦子粒颜色分为黄(白)、蓝、紫(红)、褐和黑5种颜色,简化了大麦子粒颜色的划分标准^[12]。目前最普遍的确定大麦子粒颜色方法是肉眼观察,也有一些使用比色计测定的L、a、b值来确定大麦子粒的颜色^[2,10],L表示亮度,+a标记红色度,-a表示绿色度,+b表示黄色度,-b表示蓝色度,黄色大麦的L值和b值最高,黑色大麦的L值最低,紫色大麦a值最高。

2 有色大麦的品质特点及功能

2.1 有色大麦花色苷的组成、生理功能和市场经济价值

花色苷是自然界广泛分布的水溶性类黄酮化合物,是形成大麦子粒颜色的主要成分。早在1958年,D. B. Mullick等^[16]利用纸层析法对8个大麦品种(其中1个黄色大麦、3个蓝色大麦、2个紫色大麦和2个黑色大麦)进行了花色苷组成成分及含量的分析,结果表明黄色大麦不含花色苷,而黑色大麦、蓝色大麦和紫色大麦都检测到了花色苷。黑色大麦和蓝色大麦的花色苷由矢车菊素-3-葡萄糖苷和飞燕草花色苷组成,而且飞燕草花色苷葡萄糖苷的含量要高于矢车菊素-3-葡萄糖苷,是矢车菊素-3-葡萄糖苷的3倍。紫色大麦除了含矢车

菊素-3-葡萄糖苷和飞燕草花色苷葡萄糖苷,还含有天竺葵花色苷葡萄糖苷,矢车菊素-3-葡萄糖苷的含量要高于飞燕草花色苷葡萄糖苷。E. S. M. Abdel-Aal等^[17]使用紫外可见分光光度计和色谱法分析了有色谷类作物的花色苷含量和组成成分,发现蓝色大麦的花色苷含量明显高于紫色小麦和白色小麦,为34.6 $\mu\text{g/g}$,主要成分为矢车菊素-3-葡萄糖苷和牵牛花色苷-3-葡萄糖苷,其组成成分的种类明显少于其他有色谷物(如蓝色小麦、紫色小麦、黑色水稻和红色水稻等)。M. J. Kim等^[2]使用高效液相色谱(HPLC)法测定127份有色大麦品系的花色苷含量和组成成分,花色苷含量的变异范围为13.0 ~ 1037.8 $\mu\text{g/g}$,蓝色大麦和紫色大麦的花色苷含量显著高于黑色大麦,分别为320.5 $\mu\text{g/g}$ 和49.0 $\mu\text{g/g}$ 。紫色大麦普遍含有矢车菊素-3-葡萄糖苷,其平均含量为214.8 $\mu\text{g/g}$,其次为芍药花色苷-3-葡萄糖苷和天竺葵花色苷-3-葡萄糖苷,约占整个花色苷含量的50% ~ 79%,而在蓝色和黑色大麦中飞燕草花色苷-3-葡萄糖苷的含量最高。另外,在所有的黑色大麦中均检测到了芍药花色苷-3-葡萄糖苷和锦葵花色苷-3-葡萄糖苷。G. G. Bellido等^[10]使用HPLC法检测了1个黄色大麦品系和1个紫色大麦品系的花色苷含量及组成,黄色大麦和紫色大麦总花色苷含量分别为210 $\mu\text{g/g}$ 和573 $\mu\text{g/g}$,麸皮中的含量分别为1587 $\mu\text{g/g}$ 和3534 $\mu\text{g/g}$,明显高于E. S. M. Abdel-Aal等^[17]报道的蓝色和紫色小麦(153 $\mu\text{g/g}$ 和13 $\mu\text{g/g}$)、黑色和红色水稻(2284 $\mu\text{g/g}$ 和22 $\mu\text{g/g}$)及蓝色、粉色、紫色和红色玉米(225 $\mu\text{g/g}$ 、93 $\mu\text{g/g}$ 、965 $\mu\text{g/g}$ 和559 $\mu\text{g/g}$)的花色苷含量。在黄色大麦和紫色大麦中一共检测到了17种花色苷的组成成分,紫色大麦含有飞燕草花色苷-3-葡萄糖苷、矢车菊素-3-葡萄糖苷、牵牛花色苷-3-葡萄糖苷及其他9种未被识别的花色苷成分,而在紫色大麦的麸皮中还检测到了另外4种花色苷成分,其中1种为氯化矢车菊素,另外3种未被识别。黄色大麦的花色苷成分相对简单,只检测到了5种成分,飞燕草花色苷-3-葡萄糖苷是其主要成分,约占总花色苷含量的50%左右。N. Kohyama等^[18]研究认为紫色大麦除了含矢车菊素-3-葡萄糖苷花色苷,还含有丙二酰化矢车菊素的衍生物及矢车菊素-3-O- β -D-吡喃葡萄糖苷。紫色大麦在开花后的28d检测到了花色苷,随后矢车菊素-3-O-3-O-丙二酰基- β -D-吡喃葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-6-O-丙二酰基- β -D-吡喃葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-3,6-O-丙二酰基- β -D-吡喃葡萄糖

昔的含量在花后 35 d 内都呈增加趋势,花后 42 d 又开始减少,而矢车菊素-3-O- β -D-吡喃葡萄糖苷的含量在花后 42 d 达到最大值。

花色苷表现出各种颜色,对植物自身的授粉和种子散布起了重要作用,还可作为天然安全的食品着色剂应用于食品加工工业^[19]。研究表明,花色苷能防止紫外光辐照对皮肤的损伤,可用于化妆品行业^[20]。同时,花色苷还具有抗氧化活性^[10]、抗脂质氧化活性^[21]、抗炎活性^[22]、抗癌^[23-24]、防止肥胖症和高血糖症^[25]以及具有雌激素活性^[26]等生理功能。

2.2 有色大麦酚类物质的组成与功能

研究表明,有色大麦中含有丰富的酚类化合物,M. J. Kim 等^[2]检测了 127 份有色大麦材料,总酚类物质含量在 191.6 ~ 403.8 $\mu\text{g/g}$ 之间,绿原酸和藤黄酚是有色大麦的主要酚类物质。蓝色和紫色大麦中的间苯三酚酸、香草酸、紫丁香酸、羟基苯乙酸、二甲氧基苯甲酸、水杨酸和香豆酸含量明显高于黑色大麦,其总酚类物质的含量也高于黑色大麦,但是黑色裸大麦的酚酸含量最高,颜色越黑酚酸含量越高。

酚类化合物是啤酒多酚的主要来源,是啤酒中重要的内源性抗氧化剂,对成品啤酒的色泽、口感和稳定性有重要影响^[27],加拿大曾经将蓝色大麦作为商品化的啤酒大麦品种^[11],黑色大麦是生产高档黑啤酒的主要原料之一。酚类物质还具有很强的抗氧化性,能防止冠心病和癌症等,还能减缓衰老^[28]。酚类物质能影响昆虫的消化系统,使植物具有杀虫性,增加作物的产量^[29-30]。

2.3 有色大麦其他品质特点与用途

研究表明,大麦子粒中蛋白质、硫胺素(VB_1)、核黄素(VB_2)和尼克酸(VB_3)的含量高于稻谷、谷子、小麦和玉米等谷类作物,另外大麦子粒中还富含人体必需的 8 种氨基酸,其中赖氨酸和色氨酸的含量明显高于小麦、水稻和玉米,大麦子粒中的微量元素比如钙、铁、锌、铜和硒也高于其他谷物^[9]。虽然普通大麦具有全面而独特的营养成分,但有色大麦具有比普通大麦更高的营养成分含量。黑色大麦与白色大麦营养成分对比分析发现,黑大麦的灰分含量为 20.6 mg/g ,粗脂肪含量为 16.6 mg/g ,总糖含量为 630.3 mg/g ,粗纤维含量为 61.2 mg/g ,磷含量为 3.71 mg/g ,分别比白大麦高出 0.18%、0.22%、2.79%、1.47% 和 0.012%^[4]。测定利马黑大麦 \times 舟麦 2 号杂交育成的黑大麦品种的营养成分,发现该黑大麦品种的粗蛋白含量为 11.17%,粗纤维含

量为 6.63%,粗脂肪含量为 8.77%,核黄素含量为 2.44%,分别比普通大麦提高了 2.85%、13.18%、12.58% 和 34.07%;检测的 17 种人体必需氨基酸中有 14 种组分含量高于普通大麦;钙含量为 701.4 $\mu\text{g/g}$,也比普通大麦高 9.49%^[31]。

作为饲料大麦,J. Frégeau-Reid 等^[32]研究发现,紫色大麦往往具有较低的纤维含量。而 T. M. Choo 等^[33]研究发现,紫色大麦的半纤维素、纤维素和木质素含量与黄色大麦并无明显差异,但是黑色大麦的木质素含量要比黄色大麦高 7%。

有色大麦还与抗病和抗逆性有关。T. M. Choo 等^[33]报道紫色大麦和黑色大麦的赤霉病发病率要低于黄色大麦。张想平等^[6]报道黑糯大麦品种具有高抗倒伏、耐旱、抗干热风、抗条纹病等特点,整个生育期不需要喷药防病。李忠娟等^[31]利用利马黑大麦与舟麦 2 号杂交育成的黑大麦品种也具有高抗赤霉病和白粉病的特点。

3 有色大麦的遗传与品种改良

3.1 有色大麦的遗传

黑色大麦最早被发现于亚洲的西南部,中国的西藏也有分布^[34]。遗传分析发现黑色大麦由 1 对显性基因 *Blp* 控制,位于染色体 1HL 上。大麦黑色的程度与 *Blp* 的等位基因有关,*Blp1. b* 基因控制的黑色大麦,其颜色特别深,*Blp1. mb* 控制中等黑度的大麦,而携带 *Blp1. g* 基因的大麦则显示浅黑色或灰色^[35]。郑文茂^[8]通过黑色大麦与黄色大麦杂交,观察后代颜色分离情况,发现黑色性状的遗传力很强,在自然条件下黑色直感现象较为明显,而且黑色性状对黄色性状为显性。

通过对紫色大麦自然突变体的遗传分析发现,紫色大麦受 2 个显性互补基因控制(*Pre1* 和 *Pre2*),被定位于染色体 2HL 上,距大麦六棱穗状花序基因 *vsr1* 和无原花色素基因 *ant2* 的遗传距离分别为 17.1 cM 和 11.2 cM^[35]。对紫色条纹的皮大麦进行遗传分析发现,大麦颖壳的紫色条纹受 1 个显性基因 *Pvc* 控制,也被定位在染色体 2HL 上,距大麦六棱穗状花序基因 *vsr1* 的遗传距离为 22.2 cM^[36]。

早在 1950 年,J. I. Mayler 等^[36]报道蓝色大麦受 2 对互补基因 *Blx1* 和 *Blx2* 控制,后来的研究发现控制大麦子粒蓝色性状是由 5 个显性互补的等位基因控制,分别为 *Blx1*、*Blx2*、*Blx3*、*Blx4* 和 *Blx5*,其中基因 *Blx1*、*Blx3* 和 *Blx4* 位于染色体 4HL 上,*Blx2* 和 *Blx5* 位于染色体 7HL 上^[37]。

3.2 有色大麦品种改良研究进展

有色大麦是珍贵的大麦资源,在我国对于有色大麦的品种改良目前主要是针对黑大麦。四川甘孜州利用收集的 50 多份黑大麦材料,通过杂交、辐射等手段曾积累过 200 多份中间黑色大麦材料^[37]。1977 年我国自秘鲁引进了黑大麦 Lima,1987 年江西农业科学院利用黑大麦 Lima 作为母本、浙江二棱黄皮大麦舟麦 2 号为父本,通过系谱法育成了黑大麦新品种赣大麦 1 号。该品种是我国首次育成的黑大麦新品种,具有大粒、早熟、高抗白粉病和赤霉病,子粒营养丰富,富含硒元素,麦芽品质优良等特点,是生产优质啤酒的理想原料^[38]。随后荆州农业科学院用赣大麦 1 号作母本、鄂啤 2 号作父本杂交,育成了另一黑大麦新品种荆黑大麦 1 号,该品种成穗率高、丰产性好、中抗赤霉病^[39]。2003 年,江苏省沿海地区麦类科学研究院利用美国引进的黑麦 KB36 为父本杂交,通过辐射育成了黑大麦新品种奥比黑,该品种分蘖力强、成穗率高、粒大且饱满、产量高。2010 年,甘肃省农垦农业研究院引进国外高代材料定向选育了黑色裸大麦品种垦啤黑糯 1 号,该品种支链淀粉含量高达 98.94%,是目前国内选育的唯一的糯性黑色裸大麦品种,抗病抗逆,产量较高,富含 17 种氨基酸和多种营养元素,是产业化开发无公害食品或保健品的理想原料^[40]。张明生等^[7]将大麦黑色子粒性状转育到恢复系中,选育出了黑色大麦恢复系盐 9863。

4 有色大麦的利用与存在的问题

4.1 有色大麦的利用前景

4.1.1 有色大麦具有重要的商业利用价值 有色大麦不仅含有丰富的营养成分和特殊的保健功能,而且含有的特殊色素还可以作为天然的食品添加剂应用于食品加工,特殊色素还具有防止紫外线辐射和保健美容功效,也可用于日用化妆品工业制备防晒霜、黑发剂等。因此有色大麦在医学保健学科、食品加工学科及商业贸易等行业与领域都具有重要的利用价值。

4.1.2 有色大麦可作为特殊的种质资源 有色大麦可以作为珍贵的种质资源,是培育新的特殊颜色大麦新品种的基础,通过杂交和选择等育种手段,可以培育出更多品质优良的新品种,满足人们对此类品种的需求。

4.1.3 有色大麦可作为专用大麦的标记性状 子粒颜色很容易识别,是很好的标记性状。在小麦中

就曾利用子粒的紫色果皮或蓝色糊粉层作为专用小麦的标记性状^[41]。日本曾经将紫色大麦作为区分糯性大麦的标记性状^[13],加拿大育种家也曾将蓝色大麦作为啤酒大麦的标记性状^[11]。

4.1.4 有色大麦杂种优势的利用 大麦的有色性状相对于黄色性状一般表现为显性,因此当不育系为黄色时,将有色性状转育到恢复系中,就能选育出有色大麦恢复系。张明生等^[7]利用该特性培育出了黑色大麦恢复系盐 9863。

4.2 有色大麦研究存在的问题

目前对有色大麦组成成分研究主要是花色苷和多酚类物质,对于有色大麦的其他品质性状分析较少,比如有色大麦的蛋白质含量和质量、淀粉特性、浸出率、糖化力、库尔巴哈值和 α -氨基氮等。需要进一步对这些性状进行深入研究,使有色大麦更好地应用于生产。

关于有色大麦相关基因的遗传学研究还不够深入。目前只是利用全套染色体形态性状标记,将有色基因定位到相应的染色体上,还没有进行分子标记的基因定位。而在水稻中,研究者已经使用不同的遗传群体对水稻的有色基因进行了遗传分析和分子标记定位,甚至克隆了控制水稻颜色的基因,明确了其作用机理^[42]。因此关于有色大麦相关基因的遗传机理还有待于进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Mayer K, Waugh R, Brown J, et al. A physical, genetic and functional sequence assembly of the barley genome [J]. *Nature*, 2012, 491: 711-716
- [2] Kim M J, Hyun J N, Kim J A, et al. Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55: 4802-4809
- [3] 李兰芬. 特种黑皮大麦资源的营养价值及开发利用 [J]. *农民致富之友*, 1998 (12): 14
- [4] 申晓蓉, 樊梦原, 陈莉, 等. 黑大麦与白大麦营养成分对比分析 [J]. *西北民族大学学报: 自然科学版*, 2012, 33 (1): 30-34
- [5] 李润喜, 李学才, 毋玲玲. 黑裸大麦甘蓝 5 号的营养功能特性及利用 [J]. *甘肃科技*, 2012, 28 (18): 169-171
- [6] 张想平, 雷耀湖, 何庆祥. 黑糯大麦的品种特性及营养品质分析 [J]. *种子*, 2011, 30 (9): 85-86
- [7] 张明生, 周加春, 吴春, 等. 黑色大麦的利用价值及其发展对策 [J]. *大麦科学*, 2001, 41 (1): 9-10
- [8] 郑文茂. 黑色大麦品种资源的优势 [J]. *大麦科学*, 1992, 32 (3): 5-6
- [9] 王明明. 浅谈黑大麦的开发利用 [J]. *甘肃科技纵横*, 2010, 39 (5): 60-62
- [10] Bellido G G, Beta T. Anthocyanin composition and oxygen radical scavenging capacity (ORAC) of milled and pearled purple, black, and common barley [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57: 1022-1028
- [11] Fairs D G. The physiology and genetics of the kernel color of barley [D]. Columbia: University of British Columbia, 1955
- [12] 张京, 刘旭. 大麦种质资源描述规范和数据标准 [M]. 北京:

- 中国农业出版社,2006
- [13] Bothmer R V, Sato K, Komatsuda T, et al. Diversity in Barley (*Hordeum vulgare*): The domestication of cultivated barley[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B. V., 2003
- [14] Sparks G A, Malcolm J P. Barley identification by grain characters in New Zealand[J]. N. Z. J. Exper Agric, 1978, 6: 1-10
- [15] 孙明茂, 韩龙植, 李圭星, 等. 水稻花色苷含量的遗传研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(2): 239-245
- [16] Mullick D B, Fairs D G, Brink V C, et al. Anthocyanins and anthocyanidins of the barley pericarp and aleurone tissue[J]. Can J Plant Sci, 1958, 38: 445-456
- [17] Abdel-Aal E S M, Young J C, Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54: 4696-4704
- [18] Kohyama N, Ono H, Yanagisawa T. Changes in anthocyanins in the grains of purple waxy hull-less barley during seed maturation and after harvest[J]. J Agric Food Chem, 2008, 56: 5770-5774
- [19] Wu X, Bwcher G R, Holden J M, et al. Concentration of Anthocyanins in common foods in the United States and Estimation of normal consumption[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54: 4069-4075
- [20] Cimino F, Ambra R, Canali R, et al. Effect of Cyanidin-3-O-glucoside on UVB-Induced response in human keratinocytes[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54: 4041-4047
- [21] Satué-Gracia M T, Heinonen M, Frankel E N. Anthocyanins as antioxidants on human low-density lipoprotein and lecithinliposome systems[J]. J Agric Food Chem, 1997, 45: 3362-3367
- [22] Wang H, Nair M G, Strasburg G M, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of anthocyanins and their aglycon, cyanidin, from tart cherries[J]. J Nat Prod, 1999, 62: 294-296
- [23] Kang S Y, Seeram N P, Nair M G, et al. Tart cherry anthocyanins inhibit tumor development in APC^{Min} mice and reduce proliferation of human colon cancer cells[J]. Cancer Lett, 2003, 194: 13-19
- [24] Hyun J W, Chung H S. Cyanidin and malvidin from *Oryza sativa* cv. Heugjinjubyeo mediate cytotoxicity against human monocytic leukemia cells by arrest of G2/M phase and induction of apoptosis[J]. J Aric Food Chem, 2004, 52: 2213-2217
- [25] Tsuda T, Horio F, Uchida K, et al. Dietary cyanidin 3-O-β-D-glucoside-rich purple corn color prevents obesity and ameliorates hyperglycemia in mice[J]. J Nutr, 2003, 133: 2125-2130
- [26] Elmar S, Helga S. Estrogenic activity of naturally occurring anthocyanidins[J]. Nutr Cancer, 2001, 41: 145-149
- [27] Vanderhaegen B, Neven H, Verachtert H, et al. The chemistry of beer aging a critical review[J]. Food Chem, 2006, 95: 357-381
- [28] Holtekjolen A K, Kinitz C, Knutsen S H. Flavanol and bound phenolic acid contents in different barley varieties[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54: 2253-2260
- [29] Bily A C, Burt A J, Ramputh A L, et al. HPLC-PAD-APCI/MS assay of phenylpropanoids in cereals[J]. Phytochem Anal, 2004, 15(1): 9-15
- [30] Aerts R J, Barry T N, McNabb W C. Polyphenols and agriculture: beneficial effects of proanthocyanidins in forages[J]. Agric Ecosyst En Viron, 1999, 75(1-2): 1-12
- [31] 李忠娴, 张思文, 谢建坤. 特种黑大麦新品种资源的开发与利用[J]. 大麦科学, 1996, 36(3): 4-7
- [32] Frégeau-Reid J, Choo T M, Ho K M, et al. Comparisons of two-row and six-row barley for chemical composition using doubled-haploid lines[J]. Crop Sci, 2001, 41(6): 1737-1743
- [33] Choo T M, Vigier B, Ho K M, et al. Comparison of black, purple, and yellow barleys[J]. Genet Resour Crop Ev, 2005, 52: 121-126
- [34] Takahashi R. Genetic features of east Asian barleys[R]. Okayama, Japan: Barley Genetics V. Proc. 5th Int. Barley Genet Symp, 1987: 7-20
- [35] Franckowiak J D, Lundqvist U. New and revised descriptions of barley genes[J]. Barley Genet Newsl, 1997, 26: 209
- [36] Mayler J I, Stanford E H. Color inheritance in barley[J]. J Am Soc Agr, 1942, 34: 427-436
- [37] 冯继林, 甲措, 刘廷辉. 四川甘孜州黑色裸大麦资源[J]. 大麦科学, 2001, 41(4): 21-22
- [38] 李忠娴, 谢建坤, 张思文, 等. 黑大麦新品种“赣大麦 1 号”[J]. 大麦科学, 2001, 41(1): 35-37
- [39] 龚德平, 陈功海, 李再兴, 等. 大麦新品种“荆黑大麦 1 号”选育[J]. 大麦与谷类科学, 2009(2): 53-54
- [40] 张想平, 雷耀湖, 何庆祥, 等. 裸大麦垦啤黑糯 1 号的品种特性及产业化开发[J]. 大麦与谷类科学, 2010(3): 46-47
- [41] 白冬梅, 白云凤, 黄晋玲. 我国黑粒小麦子粒色素基因的研究进展[J]. 陕西农业科学, 2007(1): 69-72
- [42] 童继平, 李素敏, 刘学军, 等. 有色稻米研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(1): 13-18