

# 小麦子粒铁、锌元素含量的研究进展

曹新有, 刘建军, 程敦公, 宋健民, 李豪圣, 刘爱峰, 赵振东

(山东省农业科学院作物研究所, 济南 250100)

**摘要:** 目前, 铁、锌元素营养失衡已严重影响人类健康, 而小麦作为人们的主要食物, 其子粒中铁、锌元素含量普遍较低。因此, 通过小麦育种策略提高铁、锌元素含量则被认为是最经济有效的手段, 这也引起了国内外学者的广泛关注。本文概述了小麦子粒铁、锌元素含量的遗传差异、影响因素以及分子机理的研究现状, 并展望了提高小麦子粒铁、锌元素含量的研究前景及途径。

**关键词:** 小麦; 铁; 锌

## Research Progress on Iron and Zinc Content of Wheat Grain

CAO Xin-you, LIU Jian-jun, CHENG Dun-gong, SONG Jian-min,

LI Hao-sheng, LIU Ai-feng, ZHAO Zhen-dong

(Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100)

**Abstract:** Malnutrition of iron (Fe) and zinc (Zn) minerals has been one of the most essential causes of harm to human health. Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the important staple crops as the resources of both foods and minerals. However, low content of Fe and Zn in wheat grains has caused great concerns to international scientists. Breeding of new wheat cultivars, which are rich in mineral content, is regarded as the most economical and sustainable approach to overcome mineral malnutrition. In this paper, current researches on the genetic difference, influence factors and the molecular mechanism of micronutrient enrichment were reviewed. Additionally, the perspective of research on wheat Fe and Zn quality was outlined.

**Key words:** Wheat; Iron; Zinc

矿物元素是维持人体正常生命活动所必需的物质之一, 人体对于一些常量元素需求较大, 而对铁、锌、铜等微量元素需求相对较少。但近年来, 随着人们饮食习惯和生活方式的明显改变, 营养不均衡越来越严重, 摄入的常量营养元素过高, 而微量营养元素或其他有益的非营养元素过低, 这些已成为影响人类健康的重要因素。目前, 全世界约 40 亿 ~ 50 亿人可能存在铁缺乏, 其中 20 亿人是缺铁性贫血<sup>[1]</sup>, 铁缺乏在营养不良中表现最为严重; 而大约有 20 亿人口同样面临锌缺乏, 尤其是发展中国家, 全世界每年大约有 8 万儿童由于缺锌死亡。由于缺铁、缺锌等引发的营养不良、生长发育迟缓、免疫力

下降和智力低下等一系列病症日趋严重, 尤其是在婴幼儿、妇女(孕妇)和老年人中, 此类病症已相当普遍, 微量元素营养已越来越受到人们的重视。

传统上应对铁、锌元素的缺乏, 人们往往采取定向补充、食品添加及丰富饮食结构的方法, 而这些都要求有稳定的政策导向、完整安全的加工链条和持续的投资, 其所能覆盖范围较小, 从而难以解决铁、锌缺乏的问题。为了解决这一世界性的难题, 国际农业研究磋商小组(CGIAR)等国际机构于 2003 年开始实施国际性重大农业项目 Harvest Plus 计划, 通过培育富含矿物营养成分的主要粮食作物来解决世界矿质营养缺乏的问题, 并提出了通过育种手段或

收稿日期: 2011-03-26 修回日期: 2011-05-29

基金项目: 小麦现代农业产业技术体系专项(CARS-03-4-8); 山东省农业良种工程

作者简介: 曹新有, 博士, 助理研究员, 研究方向: 小麦遗传育种。E-mail: cxytvs@163.com

通讯作者: 刘建军, 研究员, 研究方向: 小麦遗传育种。E-mail: wheat9561@sina.com

现代分子生物学技术增加粮食作物中可被利用的矿物质元素含量和生物有效性的生物强化策略,此计划的主要焦点则聚集在丰富小麦中的铁、锌两大元素上,目标是减少人们矿物质元素的营养缺乏,从而提高粮食安全及人们的生活质量。

小麦(*Triticum aestivum* L.)作为世界上主要的粮食作物,其消费量占谷物总消费量的30%,在中国的消费量仅次于水稻。我国居民,尤其是北方居民食物中的热量、蛋白质及大部分铁、锌元素主要来自小麦,因而小麦营养品质直接关系到人们的身体健康。由此,选育和推广子粒富集铁、锌元素能力强的小麦品种,成为解决微量元素营养匮乏问题最有效的途径之一。

## 1 小麦铁、锌元素含量的差异及影响因素

### 1.1 小麦近缘属及普通小麦基因型间子粒铁、锌元素含量的差异

小麦不同近缘种中,铁、锌含量差异非常显著。郝志等<sup>[2]</sup>对19份小麦亲缘种及普通小麦中国春进行了微量元素测定,结果表明,铁含量的变幅为27.7~124.32mg/kg,其中塔城高拉山小麦含量最高,比普通小麦中国春高出174.50%,西藏半野生小麦最低,为27.7mg/kg;锌含量的变幅为21.93~53.43mg/kg,其中栽培二粒小麦含量最高,比普通小麦中国春高出72.31%,密穗小麦最低。国外的一些研究也同样表明普通小麦与远缘小麦及近亲种间的锌元素含量变异也很大,其顺序为黑麦>小黑麦>大麦>普通小麦>燕麦>硬粒小麦<sup>[3-5]</sup>。

普通小麦不同基因型子粒铁、锌元素含量的差异也较大,同时,几乎所有的基因型中子粒铁含量都大于锌含量<sup>[6]</sup>。Alexei等<sup>[7]</sup>对亚洲中部的66份冬、春普通小麦的铁、锌含量进行测定,发现铁的含量在25~56mg/kg范围内,平均38mg/kg;锌含量在20~39mg/kg范围内,平均28mg/kg;石荣丽等<sup>[8]</sup>对中国微核心种质库的262份核心种质的微量元素进行了分析,结果表明基因型差异显著,子粒铁浓度范围是34.2~61.2mg/kg;锌浓度范围26.3~76.0mg/g。张勇等<sup>[9]</sup>对240份北方冬麦区小麦品种及高代品系的子粒矿物质元素测定发现,品种间铁、锌含量存在明显差异,铁含量变幅在32.5~65.6mg/kg,平均41.9mg/kg,锌含量变幅在19.9~43.9mg/kg,平均29.3mg/kg。楚秀生等<sup>[10]</sup>对山东省的426份地方品种资源进行了铁、锌等微量元素含量的测定,从中控

掘出铁元素含量较高的山东昌邑的落麦(含量为41.8mg/kg)及锌元素含量较高的山东武城的大青芒(含量为50.4mg/kg)。傅兆麟等<sup>[11]</sup>对中国黄淮麦区255份骨干种质材料的小麦子粒的锌元素进行测量,结果发现,变幅为7.995~145.898mg/kg,平均测定值为24.011mg/kg。因此,适当利用铁、锌含量高的远缘及近缘材料做亲本,通过育种手段来提高普通小麦品种子粒的铁、锌含量具有很大的潜力,将会在解决铁、锌元素缺乏上取得较好的结果。

### 1.2 小麦不同部位间铁、锌元素含量的差异

铁、锌元素即使在同一小麦品种的不同部位,其积累量也不尽相同,一般为根部>子粒>茎和叶<sup>[12]</sup>。在同一穗上,从穗子中部到两端铁、锌含量平均减少10%~30%,麦穗中部的小穗中第3朵小花所结子粒的锌含量最低<sup>[13]</sup>。在子粒中,胚和糊粉层的铁、锌含量较高,胚乳中的含量较低<sup>[14-15]</sup>。Ozturk等<sup>[16]</sup>研究发现,在小麦的胚和糊粉层中锌含量可达150mg/kg,而胚乳中仅为15mg/kg;由此可见,通过改进小麦的制粉工艺也可提高人们对铁、锌元素含量的吸收。

### 1.3 栽培措施对小麦子粒铁、锌元素含量的影响

不同栽培方式能显著影响小麦子粒中铁元素含量,但不影响锌元素含量<sup>[12]</sup>。不同的库源调节(去叶、穗遮光、去50%小穗)对小麦的铁、锌元素含量影响较为明显,去叶不仅使子粒重和子粒蛋白质含量显著降低,而且使子粒铁、锌元素含量明显降低;穗遮光使子粒重量显著降低,蛋白质含量略有提高,子粒微量元素含量的变化因品种和元素类型而异,总体趋势为铁、锌元素含量增加;去小穗减少库,使各品种剩余子粒粒重略有增加,而蛋白质含量提高,子粒铁、锌元素含量均较大幅度提高<sup>[17]</sup>。另外,肥料的使用对小麦子粒铁、锌元素含量的影响也较大,如施用氮肥可显著提高小麦子粒中铁、锌元素含量<sup>[18]</sup>。单施磷肥能提高子粒产量,但减少其子粒的锌元素含量;单施钾肥增加铁元素含量,但减少子粒产量<sup>[19]</sup>。长期施用锌肥,可显著提高小麦子粒锌元素含量<sup>[20]</sup>,可见通过增施锌肥,是提高小麦子粒锌含量的有效途径之一。

## 2 小麦子粒铁、锌元素含量间及其与其他因素间的相关性

### 2.1 小麦子粒铁、锌元素含量间及其与产量的关系

Alexei等<sup>[7]</sup>研究表明,春小麦子粒中铁和锌的含量均呈正相关关系,并且与子粒蛋白含量呈显著

正相关,而铁、锌元素含量与植株高度、谷蛋白含量则呈显著的负相关;因此育种过程中就有可能同时提高这两种微量元素的含量。虽然也有报道认为铁、锌元素含量几乎没有相关性<sup>[21]</sup>,但前人的大部分研究都表明了野生小麦、六倍体栽培小麦等种质材料中铁、锌元素含量具有显著的正相关关系<sup>[22-23]</sup>。然而,由于子粒中铁与锌浓度之间的变异系数很大,在遗传筛选过程中,通过铁(锌)含量推断锌(铁)含量还有待进一步商榷。

在缺锌的土壤中,子粒锌含量低的植株表现较差的幼苗活力及田间表现,在雨养条件下,子粒富含锌的小麦均有较好的幼苗表现,且产量是贫含锌的植株的2倍;目前普遍研究认为,铁、锌元素含量高的小麦幼苗通常活力高、抗逆性强,要比种植在微量元素贫瘠或逆境土壤中铁、锌元素含量少的种子更能获得较高的产量<sup>[24-30]</sup>。

## 2.2 小麦子粒铁、锌元素含量与营养拮抗、增强因子的关系

研究表明,大宗作物中均含有影响植物铁、锌元素生物有效性的营养拮抗因子,如植酸、纤维素和丹宁等,它们不仅能与铁、锌等微量元素形成螯合物,而且通过某种调控机制能够调节铁、锌的吸收、运转以及在植物体内可食部分的重新分配<sup>[13,31-32]</sup>。一些研究表明,植物可食蛋白部分的植酸含量的差异严重影响铁、锌元素的含量。目前,通过非转基因技术已经获得了一些小麦低植酸突变体,这些突变体子粒往往表现出较高的铁、锌含量<sup>[33]</sup>。

而有机酸、氨基酸、长链脂肪酸、 $\beta$ -胡萝卜素、植酸酶等营养增强因子与铁、锌元素含量的生物有效性呈显著的正相关<sup>[31-32]</sup>。植物植酸酶(phytase)广泛存在于成熟的植物种子内,它作用于植酸的第6号C上的磷酸基团,是将植酸逐步降解为肌醇和磷酸的一类高分子量组氨酸磷酸酶。小麦种子具有很高的植酸酶活性,约为1500个活性单位,其远远大于水稻、玉米等作物的活性。目前,通过转基因方法将微生物植酸酶基因转入小麦,已获得了转微生物植酸酶基因的小麦植株,这些植株种子植酸酶活性得到了显著的增强,使铁、锌元素的生物有效性大大增强<sup>[34]</sup>。

## 2.3 小麦子粒铁、锌元素含量与加工因素及种皮颜色等的关系

铁、锌等微量元素主要集中在小麦子粒的糊粉层,胚中也有大量存在,而在淀粉胚乳中则含量很低<sup>[16]</sup>。小麦磨粉则是将麦麸去除制成精粉,因此,

在面粉加工过程中必然就减少了铁、锌等微量元素的含量,不同的出粉率也影响面粉中铁、锌元素的含量,而对于面粉加工的食品,经过发酵的食品要比非发酵的食品铁含量增加大约3%~10%<sup>[35]</sup>。

大量的研究表明,有色小麦子粒中,如黑、蓝、紫粒小麦的铁、锌元素含量均显著高于普通白粒或红粒小麦,且有色小麦子粒不仅微量元素含量高,其子粒中蛋白质、花色苷、赖氨酸等营养元素均显著高于白粒或红粒小麦,这是由于有色小麦子粒中花青苷含量较高,而一般花青素具有与铁等金属离子络合的特性,所以在花青素含量高的有色小麦中,矿质元素及微量元素都显著高于普通小麦<sup>[36]</sup>,因此,有色小麦作为种质资源将有更大的利用价值。

## 3 小麦子粒铁、锌元素调控的分子机理研究

利用QTL能有效分析作物中铁、锌含量的基因位点,从而提高铁、锌含量育种的效率。在玉米研究中周金凤等<sup>[37]</sup>利用三交组合DH8×登海40和DH86×沈137的F<sub>1</sub>DH群体A和群体B,对2个供试玉米群体2年间的试验结果进行了QTL分析。2007年检测到了5个与这些性状有关的QTL,可解释的遗传变异范围为9.41%~43.67%;2008年检测到9个QTL,可解释的遗传变异范围为11.21%~42.96%。发现控制锌含量的1个位点位于第3染色体的p-umc1399~p-bnlgl605区段;在水稻上Gregorio等<sup>[38]</sup>利用IR64×Azucena组合的DH群体,构建了一张包含175个多态性标记的连锁图谱,检测到3个控制水稻子粒铁含量的主效QTL位点,位于第7、8、9染色体上,分别解释表型变异的30.3%、21.3%和19.0%。这可能是标记辅助选择的重要位点;Ozkan等<sup>[39]</sup>在小麦上也将一个与铁、锌、镁和铜的含量相关的QTL定位于小麦的5A染色体上。而预期基于数量遗传的轮回选择或回交可作为创造富铁、富锌基因型的工具,QTL的发现则有助于开发辅助标记选择技术,从而促进高铁、高锌元素含量的品种选育。

而要提高小麦子粒中铁、锌元素的含量,就是提高小麦对土壤中铁、锌元素的吸收、转运和积累能力。所以,研究小麦对铁、锌元素的吸收、运输、积累机理及其控制基因,对微量元素育种具有重要意义。近年来,随着分子标记、转基因等生物技术的快速发展,作物铁、锌元素调控的分子机理研究报道逐渐增多。研究表明,很多基因或基因家族可能参与作物

铁、锌元素的调控过程中,如 ZIP 家族<sup>[40]</sup>、NRAMP 家族<sup>[41]</sup>、YSL 家族<sup>[42]</sup>、bHLH 类<sup>[43]</sup>、NAC 类蛋白<sup>[44]</sup>等。这些蛋白在细胞中对铁、锌元素的阳离子进行吸收、转运和调控<sup>[45-46]</sup>; Eide 等<sup>[47]</sup>就通过筛选拟南芥根部 cDNA 文库,发现了 ZIP 家族的 AtIRT1 (iron-regulated transporter 1) 和 AtIRT2 蛋白。AtIRT1 蛋白具有广谱的底物特异性,它不仅能转运铁,而且还能转运锌、锰以及镉。而 AtIRT2 与 AtIRT1 有很高的相似性,它们都在根尖受低铁诱导表达。随后在水稻<sup>[48]</sup>、豌豆<sup>[49]</sup>和苹果<sup>[50]</sup>中也分离到 AtIRT1 的同源基因 OsIRT1、PsRIT1 和 MxIRT1。而在野生小麦中发现,NAC 类蛋白 TtNAM-B1 能增加麦粒中蛋白质、锌和铁的含量。将该基因转入到普通栽培小麦后,提高了麦粒的蛋白质和铁、锌的含量。与此同时,将所有与这个基因有关的拷贝从普通栽培小麦品种中敲除后,小麦的叶片寿命延长,但麦粒的蛋白质和铁、锌含量降低<sup>[43]</sup>,表明 TtNAM-B1 可能通过调节叶片衰老过程中营养元素向种子内的转运来调控种子中铁和锌等营养元素的含量。

#### 4 提高子粒铁、锌元素的途径及展望

##### 4.1 加强子粒富集铁、锌元素小麦种质筛选与创制

目前我国保存农作物种质资源近 40 万份,居世界第 2 位,而编入全国小麦种质资源目录的就达 4 万余份,这些种质资源为我国作物新品种培育奠定了坚实的遗传基础<sup>[51-52]</sup>。而当前急需解决的科学问题则是从这些数量众多的种质资源中筛选出铁、锌含量高的种质材料,为培育铁、锌含量高的 wheat 品种提供遗传基础;在筛选种质的同时,还应当积极创制新的种质材料,以铁、锌含量高的种质材料为基础,用各地大面积推广的品种进行逐步改良,创制出中间材料,为培育铁、锌含量高的 wheat 新品种提供优良的遗传种质资源。

##### 4.2 提高小麦子粒中铁、锌元素的生物有效性

当前国际小麦铁、锌元素营养品质遗传改良的工作重点在于提高子粒的铁、锌含量,但未能将子粒植酸含量和植酸酶活性这两个对微量元素生物有效性具有重要影响的性状整合到育种目标中。研究表明,谷物中铁、锌的利用率仅 20% 左右,其主要是由于小麦子粒中所含的铁、锌等微量元素多与植酸络合形成不易被人体吸收的植酸盐所致<sup>[53-54]</sup>。因此可以通过降低小麦子粒中的植酸含量和提高植酸酶活性两条途径进行深入研究,并与医学相结合,研究人体对微量元素的吸收、消化机制,以求发现新的研

究突破点,最终实现小麦子粒中铁、锌元素生物有效性的明显提高。

##### 4.3 加强传统育种技术与生物技术相结合提高小麦子粒铁、锌微量元素的含量

小麦子粒中铁、锌元素含量是由多基因控制的数量性状,受基因型和环境效应的共同影响。简单的形态标记和经典遗传学研究,无法阐明单个基因的行为和效应,亦不能提供基因的实际位置和功能上的信息。对此,传统的育种方法无法有较大突破,故只有将分子育种与传统育种途径有机结合,利用现代分子生物学技术和理想的分离群体,通过多年多点试验,筛选出与小麦子粒铁、锌含量相关基因紧密相连锁的分子标记,并对控制铁、锌含量的基因进行精细定位和功能分析,最终克隆出控制小麦子粒铁、锌含量的主效基因,将为子粒富集铁、锌的基因改良和分子标记辅助选择奠定物质基础。

##### 4.4 加强产后加工、栽培等配套措施的改良与推广

在培育子粒铁、锌元素的含量高的 wheat 品种的同时,还应改良小麦产后的面粉制粉及食品加工工艺,提高面粉的出粉率,改精粉为全麦粉消费,使人们对胚及糊粉层中的高含量铁、锌元素得以吸收利用,提高面粉铁、锌元素的生物有效性;其次,应结合当地气候、资源特点,探索出提高小麦铁、锌营养价值的优化栽培措施,特别是肥料的使用及源库的调节;同时,还需要结合农业技术推广的特点,研究影响营养强化型小麦推广及应用的社会、经济因素,探索出营养强化小麦的推广及加工技术体系,努力做到良种良法,从而使铁、锌含量高的 wheat 品种得以大面积推广,真正解决人们铁、锌元素营养匮乏问题。

#### 参考文献

- [1] Stoltzfus R J, Dreyfuss M L. Guidelines for the use of iron supplements to prevent and treat iron deficiency anemia [M]. Washington D C: ILSI Press, 1998
- [2] 郝志, 田纪春, 姜小苓. 小麦主要亲缘种子粒的 Fe、Zn、Cu、Mn 含量及其聚类分析 [J]. 作物学报, 2007, 33(11): 1834-1839
- [3] Cakmak I, Ekiz H, Yilmaz A, et al. Differential response of rye, triticale bread and durum wheat to zinc deficiency in calcareous soils [J]. Plant Soil, 1997, 188: 1-10
- [4] Cakmak I, Derici R, Torun B, et al. Role of rye chromosomes in improvement of zinc efficiency in wheat and triticale [J]. Plant Soil, 1997, 196: 249-253
- [5] Cakmak I, Torun B, Erenoglu B, et al. Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency [J]. Euphytica, 1998, 100: 349-357, 349
- [6] Ghandilyan A, Vreugdenhil D, Aartsa M G M. Progress in the genetic understanding of plant iron and zinc nutrition [J]. Physiol-Plant, 2006, 126: 407-417
- [7] Alexei M, Hugo F G, Aigul A, et al. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia [J]. Euphytica, 2007, 155:

- 193-203
- [8] 石荣丽, 邹眷琴, 芮玉奎, 等. ICP-AES 测定中国小麦微核心种质库子粒矿质养分含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1104-1107
- [9] 张勇, 王德森, 张艳, 等. 北方冬麦区小麦品种子粒主要矿物质元素含量分布及其相关性分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1871-1876
- [10] 楚秀生, 樊庆琦, 李玉莲, 等. 山东高铁、锌小麦地方种质资源的筛选[C]// 2009 年中国作物学会学术年会论文摘要集, 2009: 14
- [11] 傅兆麟, 李明艳, 郭孙黎, 等. 黄淮麦区主要小麦种质资源锌含量测定报告[J]. 北京农业, 2007(9): 1-4
- [12] Lavado S, Porcelli C A, Alvarez R. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas[J]. Soil Tillage Res, 2001, 62(1/2): 55-60
- [13] Liu Z H, Wang H Y, Wang X E, et al. Genotypic and spike positional difference in grain phytase activity, phytate, inorganic phosphorus and zinc contents in wheat[J]. J Cereal Sci, 2006, 44: 212-219
- [14] Lott J N A, Spitzer E. X-ray analysis studies of elements stored in protein body globoid crystals of Triticum grains[J]. Plant Physiol, 1980, 66: 494-499
- [15] Mazzolini A P, Pallaghy C K, Legge G J F. Quantitative microanalysis of Mn, Zn and other elements in mature wheat seed[J]. New Phytol, 1985, 100: 483-509
- [16] Ozturk L, Yazici M A, Yucel C, et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat[J]. Physiol Plant, 2006, 128: 144-152
- [17] 张英华, 周顺利, 张凯, 等. 源库调节对小麦不同品种子粒微量元素及蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(9): 1629-1636
- [18] 李峰, 田霄鸿, 陈玲, 等. 栽培模式、施氮量和播种密度对小麦子粒中 Zn、Fe、Mn、Cu 含量和携出量的影响[J]. 土壤肥料, 2006(2): 42-46
- [19] Syltje P W, Dahnke W C. Mineral and protein content, test weight, and yield variations of hard red spring wheat grain as influenced by fertilization and cultivar[J]. Plant Food Human Nutri, 2005, 32(10): 37-49
- [20] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地长期施用锌肥对小麦吸锌及产量的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 46-48
- [21] Graham R, Senadhira D, Beebe S, et al. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches[J]. Field Crops Res, 1999, 60: 57-80
- [22] Cakmak I, Torun A, Millet E, et al. *Triticum dicoccoides*: an important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2004, 50: 1047-1054
- [23] Peterson C J, Johnson V A, Mattern P J. Influence of cultivar and environment on mineral and protein concentrations of wheat flour, bran, and grain[J]. Cereal Chem, 1986, 63: 183-186
- [24] Welch R M, Graham R D. Breeding crops for enhanced micronutrient content[J]. Plant Soil, 2002, 245: 205-214
- [25] Monasterio I, Graham R D. Breeding for trace minerals in wheat[J]. Food Nutr, 2000, 21: 392-396
- [26] Welch R M. Effects of nutrient deficiencies on seed production and quality[J]. Adv Plant Nut, 1986, 2: 205-247
- [27] Welch R M. Micronutrient nutrition of plants[J]. Critical Rev Plant Sci, 1995, 14: 49-82
- [28] Hacisalihoglu G, Hart J, Kochian L V. High- and low-affinity zinc transport systems and their possible role in zinc efficiency in bread wheat[J]. Plant Physiol, 2001, 125(1): 456-463
- [29] Hacisalihoglu G, Hart J, Wang Y H, et al. Zinc efficiency is correlated with enhanced expression and activity of zinc-requiring enzymes in wheat[J]. Plant Physiol, 2003, 131(2): 595-602
- [30] Welch R M, House W A. Meat factors in animal products that enhance iron and zinc bioavailability: Implications for improving the nutritional quality of seeds and grains[C]// 1995 Cornell nutrition conference for feed manufacturers. Ithaca, NY: Department of Animal Science and Division of Nutrition, Cornell University Agricultural Experiment Station, 1995: 58-66
- [31] Raboy V, Paman M H, Taylor G A, et al. Grain phytic acid and protein are highly correlated in winter wheat[J]. Crop Sci, 1991, 31: 631-635
- [32] Hurrell R F. Phytic acid degradation as a means of improving iron absorption[J]. Int J Vitam Nutri Res, 2004, 74: 445-452
- [33] Guttieri M, Bowen D, Dorch J, et al. Identification and characterization of a low phytic acid wheat[J]. Crop Sci, 2004, 44: 418-424
- [34] Brichepederson H, Olesen A, Rasmussen S K, et al. Generation of transgenic wheat (*Triticum aestivum* L.) for constitutive accumulation of an *Aspergillus* phytase[J]. Mol Breed, 2000, 6: 195-206
- [35] Ortiz-Monasterio J I, Palacios-Rojas N, Meng E, et al. Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding[J]. J Cereal Sci, 2007, 46: 293-307
- [36] 杨莉琳, 刘小京, 徐进, 等. 小麦子粒微量元素含量的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1113-1117
- [37] 周金凤, 黄亚群, 刘志增, 等. 玉米子粒中锌及铁铜锰含量的遗传及 QTL 分析[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(5): 593-595
- [38] Gregorio G B, Senadhira D, Htut T, et al. Improving iron and zinc value of rice for human nutrition[J]. Agri dev, 1999, 23: 68-81
- [39] Ozkan H, Brandolini A, Torun A, et al. Natural variation and identification of microelements content in seeds of Einkorn wheat (*Triticum monococcum*). [C]// Buck HT, Nisi JE, Salomon N, (Eds. Wheat Production in Stressed Environments, Proceedings of the 7th International Wheat Conference, Mar del Plata, Argentina, 27 November-2 December 2005. Springer, Netherlands, 2007, 12: 455-462
- [40] Korshunova Y O, Eide D, Clark W G, et al. The IRT1 protein from *Arabidopsis thaliana* is a metal transporter with a broad substrate range[J]. Plant Mol Biol, 1999, 40: 37-44
- [41] Curie C, Alonso J M, Le Jean M. Involvement of NRAMP1 from *Arabidopsis thaliana* in iron transport[J]. Biochem J, 2000, 347: 749-755
- [42] Roberts L A, Pierson A J, Panaviene Z, et al. Yellow stripe1. Expanded roles for the maize iron phytosiderophore transporter[J]. Plant Physiol, 2004, 135: 112-120
- [43] Bauer P, Ling H Q, Guerinot M L. FIT, the FER-like iron deficiency induced transcription factor in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiol Biochem, 2007, 45: 260-261
- [44] Uauy C, Distelfeld A, Fahima T, et al. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc and iron content in wheat[J]. Science, 2006, 314: 1298-1301
- [45] Schachtman D P, Barker S J. Molecular approaches for increasing the micronutrient density in edible portions of food crops[J]. Field Crop Res, 1999, 60: 81-92
- [46] Eide D J. Zinc transporters and the cellular trafficking of zinc[J]. Biochim Biophys Acta, 2006, 1763: 711-722
- [47] Eide D, Broderius M, Fett J, et al. A novel iron regulated metal transporter from plants identified by functional expression in yeast[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93: 5624-5628
- [48] Bughio N, Yamaguchi H, Nishizawa N K. Cloning an iron regulated metal transporter from rice[J]. J Exp Bot, 2002, 53: 1667-1682

(下转 133 页)

要存在于各群体内部, 群体内遗传多样性占总遗传多样性的 86.54%, 表明省沽油遗传变异主要来源于群体内, 群体间的遗传变异较小。这种结果可能缘于省沽油为虫媒花, 群体之间通过有性繁育系统进行基因交流, 从而降低了群体间的遗传变异。另一方面, 人为活动与农业生产常常使同一群体被分隔化而呈现小面积零星分布, 造成群体内遗传变异增加。

### 3.2 省沽油群体间亲缘关系

省沽油群体间亲缘关系分析结果表明各群体遗传一致度很高, 参试省沽油各群体间亲缘关系较近。大悟群体与桐柏群体亲缘关系最近; 石台群体与桐柏群体亲缘关系最远, 石台群体与大悟群体间亲缘关系介于两者之间。从地理分布来看, 湖北大悟与河南桐柏两群体相隔距离较近, 而与石台群体距离较远, 前两个群体间基因交流机会较多, 因而它们的遗传距离也较近。总体来看, 3 个群体的遗传一致度较高, 遗传分化较小, 这一方面与采样群体较少且所处地域距离较近有关, 同时也表明省沽油资源由于长期未受到合理保护, 有些基因资源可能已经消失。

通过以上研究结果认为, 省沽油的遗传资源保护应以种内遗传多样性的保护为主。根据目前省沽油的分布状况建议尽快开展全分布区内全部群体遗传多样性的评价, 对遗传多样性高的群体加以保护, 以免这一优良植物种遗传资源的更大流失。

#### 参考文献

- [1] 中国科学院植物所. 中国高等植物图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [2] 中国科学院植物所. 高等植物科属检索[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [49] Cohen C K, Fox T C. The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants [J]. *Plant Physiol*, 1998, 116: 1063-1072
- [50] Li P, Qi J L, Wang L, et al. Functional expression of MxIRT1, from *Malus xiaojinensis*, complements an iron uptake deficient yeast mutant or plasma membrane targeting via membrane [J]. *Plant Sci* 2006, 171: 52-59

- [3] 戴宝合. 野生植物资源学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003
- [4] 贾良智, 周俊. 中国油脂植物[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- [5] 周芳. 汉中山区山野菜资源调查及特色品种的营养成分分析与评价[D]. 临汾: 陕西师范大学生物技术与工程学院, 2004: 52-59
- [6] 江苏新医学院. 中药大辞典[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998
- [7] 毛多斌, 贾春晓, 金保全, 等. 省沽油种子油中脂肪酸的 GC-MS 分析[J]. *中国油脂* 2004, 29(3): 64-66
- [8] 贾春晓, 毛多斌, 孙晓丽, 等. 省沽油种子油中亚麻酸、亚油酸的分析[J]. *营养学报* 2004, 26(5): 410-411
- [9] 刘幼琪, 洪艳艳, 罗颖, 等. 珍珠花种子发芽条件的研究[J]. *湖北大学学报: 自然科学版*, 1999, 21(1): 81-83
- [10] 张玉洁, 邓建钦, 菅根柱, 等. 省沽油育苗及栽培技术[J]. *林业科技开发* 2001, 15(6): 34-35
- [11] 胡士军, 韩凯, 薛阳坡, 等. 省沽油种子育苗技术[J]. *河南林业科技* 2000, 20(1): 23-24
- [12] 胡干枝, 张立青, 方习海. 珍珠菜繁殖栽培技术[J]. *安徽林业* 2003(4): 19
- [13] 高广梅, 王家田, 刘峰, 等. 珍珠花种植技术[J]. *河南林业科技* 2001, 21(4): 46-48
- [14] 刘道梅. 珍珠花种子育苗技术[J]. *河南科技* 2002(12): 27
- [15] 刘正祥, 张华新, 刘涛. 省沽油嫩枝扦插生根特性[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版* 2007, 31(5): 75-80
- [16] 刘幼琪, 洪艳艳, 陈永勤, 等. 珍珠花丛生芽的诱导及生根条件的研究[J]. *湖北大学学报: 自然科学版*, 2000, 22(3): 289-291
- [17] 刘幼琪, 汤行春, 洪艳艳, 等. 珍珠花胚性愈伤组织的诱导[J]. *湖北工学院学报* 2000, 15(3): 60-62
- [18] 刘正祥, 张华新, 刘涛. 省沽油种子油脂分析与功能评价[J]. *林业科学* 2008, 44(2): 48-54
- [19] 刘正祥, 张华新, 刘涛, 等. 省沽油种子营养成分分析与评价[J]. *经济林研究* 2008, 26(3): 68-73
- [20] 张兴军, 蔡明历, 洪小平. 大别山省沽油形态特征与生态特征初步调查[J]. *湖北农业科学*, 1996(6): 58-61
- [21] 刘正祥, 张华新, 刘涛. 省沽油生物学特性研究[J]. *林业科学研究* 2007, 20(5): 705-709
- [22] Zabeau M, Vos P. Selective restriction fragment amplification: a general method for DNA fingerprinting. European Patent Application 92402629.7, (publication No. 0534858A) [P]. European Patent Office, Paris, 1993
- [23] Vos P, Hogers R, Bleeker M, et al. AFLP: A flexible technique for DNA fingerprinting[J]. *Nucleic Acids Res*, 1995, 24: 65-73

(上接第 129 页)

- [51] 董玉琛, 曹永生, 张学勇, 等. 中国普通小麦初选核心种质的产生[J]. *植物遗传资源学报* 2003, 4(1): 1-8
- [52] 邱丽娟, 郭勇, 黎裕, 等. 中国作物新基因发掘: 现状、挑战与展望[J]. *作物学报* 2011, 37(1): 1-17
- [53] Raboy V. Progress in breeding low phytate crops [J]. *J Nutri*, 2002, 132: 503-505
- [54] Otegui M S, Capp R, Staehelin L A. Developing seeds of Arabidopsis stored different minerals in two types of vacuoles and in the endoplasmic reticulum[J]. *Plant Cell* 2002, 14: 1311-1327