

杏种质资源评价、创新与利用研究新进展

张艳敏, 何天明, 冯建荣, 陈美霞, 苑兆和, 孙家正, 张大海, 吴 燕,
张立杰, 陈学森*

(山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘 要: 综述了国内外近 5 年来在杏 (*Prunus ameniaca* L.) 起源演化, 新疆伊犁野杏林群体遗传结构与遗传多样性分析, 杏风味物质化学组分, 授粉生物学与抗冻性评价, 杏远缘杂交与种质创新, 杏杂种 F_1 群体 S 基因的遗传、克隆与表达分析, 产量与品质构成因素的遗传变异以及杏新品种选育等方面的研究进展, 并提出了今后的研究方向。

关键词: 杏; 种质资源; 遗传育种; 生物技术; 综述

中图分类号: S 662.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2009) 05-0755-08

New Advances of the Apricot Resources Evaluation, Germplasm Enhancement and Utilization

ZHANG Yan-min, HE Tian-ming, FENG Jian-rong, CHEN Mei-xia, YUAN Zhao-he, SUN Jia-zheng, ZHANG Da-hai, WU Yan, ZHANG Li-jie, and CHEN Xue-sen*

(State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: The apricot (*Prunus ameniaca*) research progress in recent 5 years is reviewed in the paper, including the origin of apricot, genetic structure and diversities of populations of *Prunus ameniaca* L. in Ly River Valley, Xinjiang, evaluation on aroma compounds, pollination biology and frozen resistance, distant hybridization and creating new germplasm of apricot, inheritance and variation of S -gene, yields and quantity components among F_1 progenies, and breeding and selection new cultivars. It is proposal to construct multi-level system of protection and conservation apricot in Ly River Valley, Xinjiang and protect the rare resources practically. Some research programmes need to be studied in this field in the future were suggested.

Key words: apricot; germplasm resources; genetic breeding; biotechnology; review

杏树突出的抗旱性及杏产品良好的产业化前景使得杏树成为我国三北地区荒漠化治理及农民增收的先锋树种之一, 生产规模日渐扩大, 与此同时, 国内外有关杏的研究也取得了很大进展。陈学森等 (2001c) 曾对杏种质资源及遗传育种研究进展情况作过综述报道, 2001 年以来, 国内外学者在杏种质资源、遗传育种及生物技术等方面的研究工作又取得了许多新进展, 现综述如下, 旨在为杏种质资源的保护与利用提供依据和参考。

1 起源演化

1.1 杏属植物的亲缘关系及起源演化

按照俞德俊的分类系统, 杏为蔷薇科 (Rosaceae) 李亚科 (Prunoideae) 杏属植物 (*Ameniaca*

收稿日期: 2008-12-17; 修回日期: 2009-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30370992, 30471196); 教育部高校博士学科点专项科研基金项目 (20040434011); 山东省农业良种产业化工程项目

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: chenxs@sdau.edu.cn; Tel: 0538-8249338)

Mill), 全世界杏属共有 10 个种, 中国有普通杏 (*Ameniaca vulgaris* Lam.)、西伯利亚杏 *A. sibirica* (L.) Lam、辽杏 *A. mandshurica* (Maxim.) Skv、藏杏 *A. holosericea* (Betal) Kost、紫杏 *A. dasycarpa* (Ehrh.) Borkh、志丹杏 (*A. zhidanensis*) C. Z. Qiao、梅 (*A. mume*) Sieb、政和杏 (*A. zhengheensis*) Zhang J. Y. et Lu M. N 与李梅杏 (*A. limeisis*) Zhang J. Y. et Wang Z. M 这 9 个种, 表明我国是否属植物的起源演化中心, 其中普通杏是世界上栽培最广泛的一个种, 种质资源极为丰富 (张加延和张钊, 2003); 已有的研究表明, 普通杏最原始, 西伯利亚杏、辽杏、藏杏及梅等均由最原始的普通杏进化而来 (陈学森等, 2001c)。苑兆和等 (2007) 采用荧光 AFLP 技术及 UPGMA 法对普通杏 45 个类型以及梅杏、西伯利亚杏和辽杏进行聚类分析, 结合前人的研究结果, 初步认为杏组的演化趋势为: 普通杏 辽杏 西伯利亚杏 梅杏; 冯晨静等 (2005) 进一步采用 ISSR 技术, 对普通杏、西伯利亚杏、辽杏、藏杏及紫杏等 14 份杏种质材料的亲缘关系进行了研究, 结果表明, 普通杏与西伯利亚杏、辽杏及藏杏的亲缘关系较近, 而与紫杏的亲缘关系较远。He 和 Chen (2006) 进行的杂交试验及 SSR 分析表明, 紫杏可能起源于普通杏和櫻桃李天然杂种, 而杨红花等 (2007) 对来源于山东、辽宁等地的李梅杏种质资源及李和杏的品种共 30 份种质进行了 RAPD 和 S 等位基因的 PCR 扩增分析, 结果表明, 李梅杏与李的进化趋同性可能较杏更近。

1.2 普通杏的起源演化

Kostina (1964) 将栽培杏 (*Ameniaca vulgaris* Lam.) 的 700 个品种划分为 4 个地理生态群, 即中亚生态群、伊朗—高加索生态群、欧洲生态群及准噶尔—外伊犁生态群; 1975 年 Hough 曾在深入研究的基础上指出, 除上述 4 个生态群外, 还应存在一个华北生态品种群和华东生态群 (陈学森等, 2001c; 张加延和张钊, 2003)。由新疆野苹果 (*Malus sieversii*)、野杏 (*Ameniaca vulgaris*) 及野核桃 (*Juglans regia*) 等组成的伊犁野果林是在中亚荒漠地带山地罕见的“海洋性”阔叶林类型, 是第三纪暖温带阔叶林的子遗群落 (张新时, 1973), 其中野杏被认为是全世界栽培杏的原生起源种群, 曾对世界栽培杏的驯化起过决定性的作用 (Zhebentyayeva et al, 2003)。该地区的原始野杏种群所蕴涵的丰富的遗传多样性为熟期育种、耐晚霜及抗病育种提供了非常重要的种质资源 (Carls et al, 2003)。例如, 来自哈萨克斯坦的野杏已为抗 PPV (李痘病) 育种提供了的宝贵的种质 (Spiegel et al, 2004)。He 等 (2006) 对新疆伊犁河谷的新源、巩留和大西沟 3 个野杏 (*Prunus ameniaca* L.) 居群 81 个类型的群体遗传结构研究表明, 作为一个野生种群, 伊犁天山野杏依然保持着较高的遗传多样性水平; 基因分化系数 ($G_{st}=0.137$) 和杂合基因多样性比率 ($F_{st}=0.164$) 显示伊犁野杏的遗传分化主要存在于居群内 (83.6% ~ 86.3%)。类型间和居群间的聚类分析表明, 新源居群与巩留居群间具有较高的遗传一致性, 且二居群具有较高遗传多样性指数, 在当地生境下树体生长良好, 故应考虑将二居群纳为一体优先进行原位保护。上述研究结果为“我国是世界杏起源演化中心”的论断进一步提供了分子证据。

在长期的人为驯化和生态适应过程中, 栽培杏在亚欧大陆各地迥异的地理气候条件下形成了不同的生态地理群, 如新疆南部的环塔里木盆地各绿洲地带的品种群为中亚生态群的重要组成部分。作为最古老的栽培杏生态群, 中亚生态群遗传多样性极为丰富, 在杏演化历史中, 这一生态群向西衍生出伊朗—外高加索、欧洲生态群, 向东也渗入到华北杏生态种群质中 (He et al, 2006; 苑兆和等, 2007)。因此, 深入研究南疆栽培杏群体的遗传结构对探讨栽培杏的演化具有重要意义。苑兆和等 (2007) 进一步以南疆 3 个栽培杏群体的 85 个品种类型为试材, 利用荧光标记 AFLP 对群体遗传结构进行了研究, 结果表明, 南疆栽培杏群体拥有极为丰富的遗传多样性, 各群体以库车最高; UPGMA 聚类分析结果表明, 库车、喀什、和田 3 个亚群是相对独立的孟德尔群体, 但同时存在部分基因交流。根据上述研究结果提出了天山以南的新疆栽培杏品种类型是由天山以北的伊犁野杏演化而来, 并由原始起源中心首先传播到库车, 而后沿着丝绸之路向东西方进一步传播。

欧洲品种群在杏进化历程中是最为年轻的一个生态地理群,大多品种表现自交亲和,这一品种群除欧洲大陆品种外,还包括美洲、南非和澳大利亚商业栽培的品种 (Homaza, 2002)。Hagen 等 (2002) 用了 5 个 *EcoR* /*Mse* AFLP 引物组合对供试的 47 份杏品种进行扩增,共扩增出 379 条多态性带,多态性比率达 91.1%。UPGMA 聚类结果显示,供试的杏种质沿前苏联到南欧一线表现出遗传多样性递减的趋势,这与否从中亚起源中心向欧洲传播的历史十分吻合。

2 种质评价

2.1 风味物质化学组分

风味物质 (香味物质及糖、酸等) 的组成及其遗传的研究是果品质量评价、调控及品质育种的重要基础,选育自花结实、丰产性强、糖酸适度、风味浓郁的新品种,是杏育种的重要目标之一 (陈学森等, 2001c)。国外关于杏香味物质的研究始于 20 世纪 80 年代,先后鉴定出 80 余种化合物,其中通过香气值的分析,杏果实的特征香气成分有 α -紫罗酮和 γ -十二内酯等 (陈美霞等, 2005)。陈美霞等 (2004) 对 ‘新世纪’、‘红丰’ 成熟期果实香气成分进行分析鉴定,结果表明,新世纪检测出 74 种成分,占总峰面积的 73.604%; 红丰检测出 72 种成分,占总峰面积的 44.677%。主要成分为醇类、醛类、内酯类、酮类化合物,但其含量不同是导致两个品种香味浓淡差异的主要原因;进一步采用高效毛细管电泳仪分离测定了 10 个杏品种果实中的糖酸组分,结果表明,各糖组分及总糖含量在品种间都存在较大差异,根据有机酸组成不同,可将参试的杏品种分为柠檬酸型和苹果酸型 (陈美霞等, 2006a)。

2.2 农业生物学

2.2.1 杏种质资源若干生物学性状的评价与频度分布 Bayram 和 Kadir (2005) 对从土耳其收集到的中亚生态地理群 128 个品种类型果实性状进行评价,结果表明,果实成熟期、产量、单果质量及总糖与总酸等性状存在广泛变异,绝大多数品种甜仁,含糖量高,单果质量小,仅有 7 个品种单果质量大于 50 g。

何天明等 (2007) 对华北、中亚和准噶尔—外伊犁 3 个生态地理群的中国杏种质资源 650 个品种类型部分生物学性状进行了广泛的田间试验和野外考察,结果表明,中国杏三大生态地理群品种、类型或株系总体上表现为自交不亲和;油杏性状在中亚生态地理群品种中的频度高达 76.6%,而其它两个生态地理群的品种、类型或株系皆为毛杏;在中国杏三大生态地理群中,离核的比率均高于粘核,但不同生态地理群中离核频度存在明显差异,其中野杏类型的离核频度高达 94.6%,而华北杏仅为 58.8%;伊犁野杏、中亚杏及华北杏甜仁比率分别为 0.9%、93.1%和 44.4%。上述结果表明,油杏及甜仁性状在中亚生态地理群中的高频度分布具有独特性,其形成机制有待进一步研究。

2.2.2 制汁适应性 杏贮运性差,选育制汁或制脯等加工专用品种对杏产业的可持续发展具有重要意义。慈志娟等 (2007) 以凯特×新世纪、巴旦×凯特杂交组合的 F_1 代群体 111 个株系及凯特等 9 个杏品种果实为试材,对杏果实中与酶促褐变有关的褐变度、多酚氧化酶 (PPO) 活性、总酚含量及酚类物质组分等多个因素进行了研究。探讨了制汁用杏相关性状的分布特点,初步提出了制汁用杏的评价标准。

2.2.3 授粉生物学 杏树开花早,易遭受晚霜 (倒春寒) 危害,而严重影响当年产量。但晚霜造成杏树减产的原因,在我国不同的地区差异很大。在华北南部 (山东及河南等) 及西北地区,大多数年份的晚霜是影响传粉昆虫的活动,导致传粉受精不良而影响当年产量。因此,在这些地区,选育并推广自花结实的品种是保证杏树丰产丰收的重要基础;而在华北北部 (河北及北京等) 及东北地区,大多数年份的晚霜是直接造成杏花器官的冻害,而 NA 冰核细菌的存在进一步加剧了冻害的程度。因此,在这些地区,选育并推广抗霜冻品种,并进一步查明 NA 冰核细菌消长动态规律和研究开发

高效防霜药剂,是保证杏树丰产丰收的重要基础(杨建民等,2002,彭伟秀等,2004)。

开花授粉生物学的研究是自花结实品种选育的重要基础。郑洲等(2004)对红丰、新世纪等11个杏品种及‘特新一号’等4个新品系授粉生物学进行了研究,结果表明:按照自花授粉坐果率6%为自交亲和这个标准,红丰、新世纪等10个品种为自交不亲和品种(SI),而‘特新一号’等4个新品系是自交亲和的(SC);选自同一杂交组合不同姊妹系的红丰与新世纪杏品种相互授粉坐果率仅为0~0.73%,属于杂交不亲和;自交不亲和组合在授粉后72 h花粉管到达花柱3/4处,末端膨大,停止生长,而自交亲和组合的花粉管可以继续生长,并在授粉后96 h进入子房。

2.2.4 杏的开花期、需冷量与需热量及其相关性 David等(2007)以10个杏品种为试材,探讨了杏的开花期、需冷量与需热量及其相互关系,结果表明,参试杏品种的需冷量在596~266 CU之间(chill units, CU需冷量单位),多数在800~1200 CU。需热量在4078~5879 GDH(growing degree hours, GDH)。需冷量与开花期正相关,但需冷量与需热量负相关。

2.2.5 抗冻性 陈学森等(2001d)调查发现,不同品种的受冻率差异很大,其中山东的红荷包及红丰杏的受冻率较低,分别为45%和53%,而山东的红玉杏等品种的受冻率均在95%以上;为充分发挥杏的生态与经济效益,1990年,国家科技扶贫团在陕西白于山山区实施了“百万亩高效生态型仁用杏(甜仁杏或大扁杏)基地”建设项目。白岗栓等(2005)调查研究结果表明,在白于山山区仁用杏与当地原有杏属树种普通杏、山杏及西伯利亚杏相比,开花最早且花期短,霜冻造成的绝收年份最多,单株经济产值在白于山山区的加权平均值仅为1.226,仅为普通杏9.396的13.05%,无经济优势。因此,在白于山山区,仁用杏不可作为主栽树种。

3 种质创新

利用亲缘关系较远的种、属间的远缘杂交,比品种间的常规杂交,可产生更加丰富的遗传变异,是种质创新的有效途径之一。王发林等(2003)进行了李杏远缘杂种的胚培试验, Yang等(2004a, 2004b)针对远缘杂交的不亲和性及远缘杂种的不育性,首次提出并实施了“三级放大”的研究思路与研究方案,研究表明,“三级放大”的研究思路是有效的,目前该技术体系已获国家发明专利,并获得了一批包括李×杏、桃×杏及欧洲甜樱桃×欧李等在内的核果类果树远缘杂种新种质。赵桂玲(2003)采用路线普查和单株调查相结合的方法,对半干旱地区山杏种质资源状况进行调查,并进一步从生化角度确定部分优良类型及变异类型的遗传特性,结果表明:半干旱地区山杏资源丰富,雌蕊发育程度、单果质量、出核率、嫩枝长、核质量、果皮厚、仁质量、出仁率、仁形指数9个数量性状的变异程度较大,可作为区分山杏种质资源的主要性状;群体内可观可感的个体变异主要表现在树体、花、叶、果、核、仁、抗逆性7方面,调查发现了抗冻山杏等20种变异类型。

4 遗传育种

4.1 杏杂种 F_1 代群体的遗传变异

4.1.1 杏 S 基因的克隆与 S 基因型鉴定 我国杏品种 S 基因型鉴定方面的研究,不仅是自交不亲和分子机理研究的重要基础,而且为授粉树的合理选配提供了科学依据。引物的设计与筛选是用 S 基因特异 PCR 法确定品种 S 基因型的重要环节。Sutherland等(2004)根据樱桃、扁桃、梅、乌苏里李(*P. salicina* Lindl.)和櫻桃李(*P. cerasifera*)等5个李属树种27个 S 基因序列的保守区设计了通用引物 EM-PC2consFD 和 EM-PC3consRD, 研究表明,用这对引物对李属果树品种进行 S 基因型鉴定,效果较好。张立杰等(2007)利用已报道的5对蔷薇科李属通用引物组合对起源于我国的30个杏品种进行了 S 等位基因的专一性 PCR 扩增,并依据扩增系数和扩增效率两个指标对扩增效果进行了评价,结果表明:不同的引物组合对参试杏品种的扩增系数和扩增效率差异很大,根据 S 基因的鉴

定结果及参试杏品种的杂交授粉试验结果,确定了16个杏品种的S基因型。

4.1.2 杏S基因的遗传变异与表达分析 多年生的果树作物,杂种实生苗童期长,占地多,多数果树自交不亲和,因此果树遗传研究难度很大,一般是根据育种记录,总结分析重要经济性状的遗传变异规律或趋势。吴燕等(2005)对杏S基因的遗传研究结果表明,凯特杏的自交亲和性是可遗传的,并且其S基因型是杂合的,SC对SI为显性;对凯特×新世纪杂种F₁代群体38个株系进行S等位基因专一性PCR,结果发现,S基因虽然符合孟德尔遗传,但自交亲和性表现数量性状变异的特点,并且相同S基因型的杂种F₁代自交亲和性强度存在明显差异,表明杏的自交亲和性不仅与S基因及S基因型有关,可能还受修饰基因等其它遗传因素的调控,有待进一步研究。

为了探讨杏品种自交不亲和强度差异的分子机理,Feng和Chen(2006)利用实时荧光定量PCR技术研究自交亲和性与自交不亲和性杏*S-RNase*基因在转录水平表达的时空特性,结果表明自交亲和性与自交不亲和性杏*S-RNase*基因在授粉前后的发育进程中表达模式不同;进一步采用蛋白质组学技术鉴定自交不亲和与自交亲和杏自花授粉24h后的雌蕊蛋白质,检测出自交亲和杏自花授粉后特异表达蛋白13个,自交不亲和杏自花授粉后特异表达的蛋白9个。

4.1.3 杏产量构成因素的遗传变异及相关性 我国华北及西北生态品种群的杏品种,因受花期低温、败育花及自交不亲和等因素的影响,产量低而不稳,严重影响了我国杏产业的可持续发展。因此,中国杏近期的育种目标,首先应是丰产育种,其次是品质育种。陈学森等(2006)研究结果表明,自交坐果率、有效花比率及平均单果质量等性状在F₁中广泛分离,杂种群体的平均值低于亲中值,表现明显的衰退现象,表明这3个性状均为数量性状。单株坐果数、自交坐果率及有效花比率均与单株产量极显著正相关,是株系产量形成的主要因素;平均单果质量与单株产量的相关系数虽然为负值($r = -0.176$),但相关性不显著,出现这种结果主要是由于在多因素相关分析系统中,其他因素相互影响造成的。

4.1.4 杏品质构成因素的遗传变异 果实品质包括外观品质、内在品质、贮运品质和加工品质等,其中内在品质主要由风味物质(糖酸及香味物质等)、蛋白质、脂肪、维生素、矿物质等因素构成。因此,风味物质的组成及其遗传的研究是果品质量评价、调控及品质育种的重要基础。陈美霞等(2006b)利用气-质联用(GC-MS)及毛细管电泳技术,对凯特杏与新世纪杏及其F₁代65个株系的香味成分及糖酸组分的遗传特性进行了研究。结果表明,所分析的49种香味成分中,有37种为双亲共有,12种双亲之一具有。糖酸总量及各组分在后代中虽然均表现为连续性变异,但各组分的基因效应存在较大差异,通过杂交选育高柠檬酸、果糖及葡萄糖含量的株系或品种具有很大优势。

4.2 生物技术与杏新品种选育

李痘病(Sharka, *Plum pox virus*, PPV)是影响杏生产的最严重的病毒病,最早于1917年在保加利亚发现,以后在欧洲、北非及智利蔓延,最近又先后传播到美国、加拿大及中国,目前尚没有有效的防控措施。选育并推广抗性品种是防治李痘病的有效途径,已在杏PPV抗性种质的发现、分离群体构建、遗传模式及QTL定位等方面的研究取得了新进展(Lambert et al, 2007)。

近几年来,国内学者采用常规有性杂交与生物技术相结合的育种路线,育成了一批早熟或特早熟杏新品种,丰富了我国杏品种构成,显示出生物技术的巨大潜力。陈学森等(2001a, 2001b)育成的新世纪及红丰两个早熟胚培杏新品种,具有开花晚、成熟早、果个大、品质优、外观美等特点,其早期丰产性虽然不如凯特、金太阳,但明显优于红荷包及巴旦水杏等国产品种。通过国家农业科技成果转化基金项目的实施,已在山东、甘肃、山西、陕西、北京、河北、新疆及辽宁建立红丰及新世纪杏区试示范园共计10余万亩,为三北杏树产业带建设做出了贡献,2007年通过了国家林业局林木品种审定委员会的审定,良种编号分别为国S-SV-PA-020-2007和国S-SV-PA-021-2007;针对红丰及新世纪杏存在的问题,课题组在研究并建立了早熟杏胚培育种技术体系的基础上,于1998年在国内首次

将凯特杏自交亲和基因引入中国杏, 2004年育成自交亲和的山农凯新 1号和山农凯新 2号两个杏新品种, 并被授予植物新品种权(陈学森等, 2005a, 2005b)。石荫坪(2002)及刘进余等(2005)分别育成了试管早红 1号、试管早红 2号及沧早甜杏 2号等 3个早熟杏新品种, 而王同坤等(2004)则从野生山杏中选育出甜仁山杏新品种, 为进一步的育种提供了种质。

5 结束语

杏(*Prunus armeniaca* L.)原产我国, 种质资源极为丰富。经劳动人民长期栽培实践, 已选育出兰州大接杏、河南仰韶黄杏、北京骆驼黄杏、河北串枝红杏、青岛关爷脸、济南红荷包及泰安水杏等近 2 000余个地方良种, 其中《中国果树志·杏卷》(张加延和张钊, 2003)分类记述了 1 463个品种类型。这些农家品种虽然各具特点, 但共同的问题是: 败育花比率高, 多数自交不亲和, 产量低而不稳, 果实贮运性能差。因此, 今后应进一步采用常规有性杂交与现代生物技术有机结合的技术路线, 选育并推广自交亲和与丰产性强、外观与鲜食或加工品质优良、贮运性能强、符合现代生产与市场要求的杏新品种, 创造新种质, 充分发挥杏树抗干旱、耐瘠薄的特点, 建设好三北杏树产业带, 把我国杏的资源优势转化为生态优势和经济优势。

已有的研究表明, 天山以南的新疆栽培杏品种类型可能是由天山以北的伊犁野杏演化而来, 并由原始起源中心首先传播到库车, 而后沿着丝绸之路向西衍生出伊朗—外高加索、欧洲生态群, 向东也渗入到华北杏生态种群质中。但中亚生态地理群中, 油杏及甜仁品种类型占的比率很高, 具有独特性, 而华北油杏及甜仁类型甚少。因此, 在栽培杏的起源演化历史中, 除中亚起源中心外, 可能还有华北起源中心, 有待进一步研究。

References

- Bai Gang-shuan, Du She-ni, Hou Xi-lu Liu Guo-bin. 2005. Observation and evaluation of almond-apricot (*A. meniacae vulgaris* × *A. sibirica*) introduced in Baiyushan Mountainous area of Northern Shanxi. *Scientia Silvae Sinicae*, 41 (5): 187 - 191. (in Chinese)
- 白岗栓, 杜社妮, 侯喜录, 刘国彬. 2005. 陕北白于山山区仁用杏引种观测与评价. *林业科学*, 41 (5): 187 - 191.
- Bayram M A, Kadir O. 2005. Analysis of morphological, pomological and yield characteristics of some apricot germplasm in Turkey. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 52: 305 - 313.
- Carlos R, Andrzej P, Verónica M, Gerardo L, Maria L B. 2003. Genetic diversity of different apricot geographical groups determined by SSR markers. *Genome*, 46: 244 - 252.
- Chen Mei-xia, Chen Xue-sen, Ci Zhi-juan, Shi Zuo-an. 2006a. Changes of sugar and acid constituents in apricot during fruit development. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (4): 805 - 808. (in Chinese)
- 陈美霞, 陈学森, 慈志娟, 史作安. 2006a. 杏果实糖酸组成及其不同发育阶段的变化. *园艺学报*, 33 (4): 805 - 808.
- Chen Mei-xia, Chen Xue-sen, Feng Bao-chun. 2004. GC - MS analysis of fruit aroma components of two apricot cultivars. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (5): 663 - 665. (in Chinese)
- 陈美霞, 陈学森, 冯宝春. 2004. 两个杏品种果香成分的气相色谱—质谱分析. *园艺学报*, 31 (5): 663 - 665.
- Chen Mei-xia, Chen Xue-sen, Wang Xin-guo, Ci Zhi-juan. 2006b. Inheritance of flavor constituents for apricot F₁ progenies of 'Katy' and 'Xinshiji' apricot. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (5): 942 - 946. (in Chinese)
- 陈美霞, 陈学森, 王新国, 慈志娟. 2006b. '凯特'与'新世纪'杏杂种后代风味物质遗传的初步研究. *园艺学报*, 33 (5): 942 - 946.
- Chen Mei-xia, Chen Xue-sen, Zhou Jie, Liu Yang-min, Ci Zhi-juan, Wu Yan. 2005. Changes of aroma constituents in apricot during fruit development. *Scientia Agricultura Sinica*, 38 (6): 1244 - 1249. (in Chinese)
- 陈美霞, 陈学森, 周杰, 刘扬岷, 慈志娟, 吴燕. 2005. 杏果实不同发育阶段的香味组分及其变化. *中国农业科学*, 38 (6): 1244 - 1249.
- Chen Xue-sen, Gao Dong-sheng, Li Xian-li, Zhang Yan-min, Zhang Lian-zhong. 2001a. 'Hongfeng'—a new early ripening apricot variety obtained by embryo culture. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (6): 575. (in Chinese)
- 陈学森, 高东升, 李宪利, 张艳敏, 张连忠. 2001a. 胚培早熟杏新品种——红丰. *园艺学报*, 28 (6): 575.

- Chen Xue-sen, Gao Dong-sheng, Li Xian-li, Zhang Yan-min, Zhang Lian-zhong 2001b 'Xinshiji'—a new early ripening apricot variety obtained by embryo culture. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (5): 475. (in Chinese)
- 陈学森, 高东升, 李宪利, 张艳敏, 张连忠. 2001b 胚培早熟杏新品种——新世纪. *园艺学报*, 28 (5): 475.
- Chen Xue-sen, Li Xian-li, Zhang Yan-min, Wu Shu-jing, Shen Hong-bo, Shu Huai-rui 2001c Reviews of the apricot germplasm resources evaluation and genetic breeding. *Journal of Fruit Science*, 18 (3): 178 - 181. (in Chinese)
- 陈学森, 李宪利, 张艳敏, 吴树敬, 沈洪波, 束怀瑞. 2001c 杏种质资源评价及遗传育种研究进展. *果树学报*, 18 (3): 178 - 181.
- Chen Xue-sen, Shen Hong-bo, Zhang Yan-min 2001d Freezing injury investigation of apricot and sweet cherry flowers. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (4): 273. (in Chinese)
- 陈学森, 沈洪波, 张艳敏. 2001d 杏及大樱桃花器官冻害调查. *园艺学报*, 28 (4): 273.
- Chen Xue-sen, Shu huai-rui, Li Xian-li, Gao Dong-sheng, Zhang Yan-min, Shen Xiang, Chen Xiao-liu, He Tian-ming 2005a 'Shannongkaixin 1'—a new apricot variety obtained by embryo culture. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (1): 176. (in Chinese)
- 陈学森, 束怀瑞, 李宪利, 高东升, 张艳敏, 沈向, 陈晓流, 何天明. 2005a 胚培杏新品种——山农凯新 1 号. *园艺学报*, 32 (1): 176.
- Chen Xue-sen, Shu huai-rui, Li Xian-li, Gao Dong-sheng, Zhang Yan-min, Shen Xiang, Chen Xiao-liu, He Tian-ming 2005b 'Shannongkaixin 2'—a new apricot variety obtained by embryo culture. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (2): 368. (in Chinese)
- 陈学森, 束怀瑞, 李宪利, 高东升, 张艳敏, 沈向, 陈晓流, 何天明. 2005b 胚培杏新品种——山农凯新 2 号. *园艺学报*, 32 (2): 368.
- Chen Xue-sen, Wu Yan, Sun Yong-hua, Liu Wen, Liang Qing 2006 Research on yield components among apricot seedlings of F_1 populations. *Scientia Agricultura Sinica*, 33 (2): 477 - 480. (in Chinese)
- 陈学森, 吴燕, 孙永华, 刘文, 梁青. 2006 杏杂种一代群体产量形成因素的研究. *园艺学报*, 33 (2): 477 - 480.
- Ci Zhi-juan, Chen Xue-sen, Xu Xiao-jie, Zhang Chun-yu, Zhang Hong, Shi Jun, Wang Hai-bo 2007 Study on fruit suitability for juicing of apricot cultivars. *Journal of Fruit Science*, 24 (1): 21 - 25. (in Chinese)
- 慈志娟, 陈学森, 徐小杰, 张春雨, 张红, 石俊, 王海波. 2007 杏制汁适应性评价指标的探讨. *果树学报*, 24 (1): 21 - 25.
- David Ruiz, Jose Antonio Campoy, Jos éEgea 2007 Chilling and heat requirements of apricot cultivars for flowering. *Environmental and Experimental Botany*, 61: 254 - 263.
- Feng Chen-jing, Zhang Yuan-hui, Xu Xiu-ying, Shi Guo-hong, Liu Wei-sheng, Meng Qing-rui, Yang Jian-min 2005 Assessment of fourteen apricot germplasm by ISSR. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 28 (5): 52 - 55. (in Chinese)
- 冯晨静, 张元慧, 徐秀英, 师国洪, 刘威生, 孟庆瑞, 杨建民. 2005 14份杏种质的 ISSR 分析. *河北农业大学学报*, 28 (5): 52 - 55.
- Feng Jian-rong, Chen Xue-sen 2006 Proteome comparison following the compatible and incompatible pollen-pistil interaction in self-incompatible apricot (*Prunus ameniaca* L.). *Protein J*, 25 (5): 328 - 335.
- Hagen L S, Khadari B, Lambert P, Audergén L M. 2002 Genetic diversity in apricot revealed by AFLP markers: Species and cultivar comparisons. *Theor Appl Genet*, 105: 298 - 305.
- He Tian-ming, Chen Xue-sen 2006 Using SSR markers to determine the population genetic structure of wild apricot (*Prunus ameniaca* L.) in the Ily Valley of west China. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54 (3): 563 - 572.
- He Tian-ming, Chen Xue-sen, Zhang Da-hai, Xu Lin, Liu Ning, Gao Jiang-sheng, Xu Zheng 2007 Frequency distribution of several biological characters in different apricot eco-geographical groups native to China. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (1): 17 - 22. (in Chinese)
- 何天明, 陈学森, 张大海, 徐麟, 刘宁, 高疆生, 许正. 2007 中国普通杏种质资源若干生物学性状的频度分布. *园艺学报*, 34 (1): 17 - 22.
- Homaza J I 2002 Identification of apricot (*Prunus ameniaca* L.) genotypes using microsatellite and RAPD markers. *Acta Hort*, 546: 209 - 215.
- Kostina K F. 1964 Application of phytogeographical method to apricot classification. *Trud Nikit Bot Sad* 37, Kolos, Moscow.
- Lambert P, Dicenta F, Rubio M, Audergén J M. 2007 QTL analysis of resistance to sharka disease in the apricot (*Prunus ameniaca* L.) 'Ponlaïs' × 'Stark Early Orange' F_1 progeny. *Tree Genetics & Genomes*, 3: 299 - 309.
- Liu Jin-yu, Li Zhi-xin, Zhang Li-shu, Fan Wen-liang, Miao Feng, Sun Xiu-kun 2005 An early ripening and excellent new apricot variety—'Cangzaotian 2'. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (1): 175. (in Chinese)
- 刘进余, 李志欣, 张立树, 范文良, 苗锋, 孙秀坤. 2005 早熟优质杏新品种——'沧早甜 2 号'. *园艺学报*, 32 (1): 175.
- Peng Wei-xiu, Yang Jian-min, Zhang Qin, Meng Qing-rui 2004 Effect of ice nucleation active bacteria on the ultrastructure of apricot varieties ovule. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (1): 21 - 24. (in Chinese)
- 彭伟秀, 杨建民, 张芹, 孟庆瑞. 2004 冰核细菌对仁用杏胚珠超微结构的影响. *园艺学报*, 31 (1): 21 - 24.

- Shi Yin-ping 2002. New earliest apricot cultivars from embryo culture 'Tube Zaohong 1' and 'Tube Zaohe 1'. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (4): 293 - 294. (in Chinese)
- 石荫坪. 2002. 特早熟杏新品种 '试管早红 1号' 和 '试管早荷 1号'. *园艺学报*, 29 (4): 293 - 294.
- Spiegel S, Kovalenko E M, Varga A, James D. 2004. Detection and partial molecular characterization of two plum pox virus isolated from plum and wild apricot in Southeast Kazakhstan. *Plant Disease*, 88: 973 - 980.
- Sutherland B G, Robbins T P, Tobutt K R. 2004. Primers amplifying a range of *Prunus* S-alleles. *Plant Breeding*, 123: 582 - 584.
- Wang Fa-lin, Zhao Xiu-mei, Li Hong-xu, Hao Yan. 2003. Study on culture *in vitro* of interspecies hybrid embryo between plum and apricot. *Journal of Fruit Science*, 22 (2): 103 - 106. (in Chinese)
- 王发林, 赵秀梅, 李红旭, 郝燕. 2003. 李、杏属间远缘杂交及杂种胚培养技术研究. *果树学报*, 22 (2): 103 - 106.
- Wang Tong-kun, Zhang Li-bin, Liu Gui-sen, Zhao Tian-yong, Wu Xue-ren. 2004. A new siberia apricot variety — 'Tianren Shanxing'. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (6): 800. (in Chinese)
- 王同坤, 张立彬, 刘桂森, 赵天永, 吴学仁. 2004. 山杏新品种 —— '甜仁山杏'. *园艺学报*, 31 (6): 800.
- Wu Yan, Chen Xue-sen, Feng Jian-rong, Chen Xiao-liu. 2005. Inheritance of S-gene among the F₁ progenies in apricot. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (3): 397 - 402. (in Chinese)
- 吴燕, 陈学森, 冯建荣, 陈晓流. 2005. 杏杂种一代群体 S-基因的遗传研究. *园艺学报*, 32 (3): 397 - 402.
- Yang Jian-min, Meng Qing-rui, Peng Wei-xiu, Li Shao-hua, Sun Fu-zai, Zhao Ting-chang. 2002. The effect of ice nucleation active bacteria on cold resistance of apricot flower organs. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (1): 20 - 24. (in Chinese)
- 杨建民, 孟庆瑞, 彭伟秀, 李绍华, 孙福在, 赵廷昌. 2002. 冰核细菌对杏花器官抗寒性的影响. *园艺学报*, 29 (1): 20 - 24.
- Yang Hong-hua, Chen Xue-sen, Feng Bao-chun, Liu Huan-fang, Zheng Zhou. 2004a. Creating new germplasm by distant hybridization in stone fruits. Embryo rescue and hybrid identification between plum and apricot. *Agricultural Sciences in China*, 3 (9): 656 - 662.
- Yang Hong-hua, Chen Xue-sen, Li Yu-hui, Feng Bao-chun, Mu Xiu-jia. 2004b. Creating new germplasm by distant hybridization in stone fruits. Effects of different treatments on cross compatibility of distant hybridization in stone fruits. *Agricultural Sciences in China*, 3 (8): 584 - 589.
- Yang Hong-hua, Chen Xue-sen, Feng Bao-chun, Wu Yan. 2007. Assessment of *Prunus amniaca* limeixing germplasm by RAPD. *Journal of Fruit Science*, 24 (3): 303 - 307. (in Chinese)
- 杨红花, 陈学森, 冯宝春, 吴燕. 2007. 李梅杏种质资源的 RAPD 分析. *果树学报*, 24 (3): 303 - 307.
- Yuan Zhao-he, Chen Xue-sen, He Tian-ming, Feng Jian-rong, Feng Tao, Zhang Chun-yu. 2007. Population genetic structure in apricot (*Prunus amniaca* L.) cultivars revealed by fluorescent-AFLP markers in Southern Xinjiang, China. *Journal of Genetics and Genomics*, 34 (11): 1037 - 1047. (in Chinese)
- 苑兆和, 陈学森, 何天明, 冯建荣, 冯涛, 张春雨. 2007. 新疆栽培杏群体遗传结构的荧光 AFLP 分析. *遗传学报*, 34 (11): 1037 - 1047.
- Zhang Li-jie, Chen Xue-sen, Chen Xiao-liu, Feng Jian-rong, Liu Xiao-li, Ci Zhi-juan. 2007. Comparison of amplification effects on apricot (*Prunus amniaca* L.) resources in China using different primer combinations. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (5): 1141 - 1146. (in Chinese)
- 张立杰, 陈学森, 陈晓流, 冯建荣, 刘晓丽, 慈志娟. 2007. 不同引物组合对中国杏 (*Prunus amniaca* L.) 品种资源 S 基因特异扩增效果的比较. *园艺学报*, 34 (5): 1141 - 1146.
- Zhang Jia-yan, Zhang Zhao. 2003. Chinese fruit tree: Apricot. Beijing: China Forestry Publishing House: 93 - 559. (in Chinese)
- 张加延, 张钊. 2003. 中国果树志·杏卷. 北京: 中国林业出版社: 93 - 559.
- Zhang Xin-shi. 1973. On the eco-geographical characters and the problems of classification of the wild fruit-tree forest in the Ili valley of Sinkiang. *Acta Botanica Sinica*, 15 (2): 239 - 253. (in Chinese)
- 张新时. 1973. 伊犁野果林的生态地理特征和群落学问题. *植物学报*, 15 (2): 239 - 253.
- Zhao Gui-ling. 2003. Study on investigations and heredity characters of germplasm resource of Siberian apricot in Subarid Area [M. D. Dissertation]. Shenyang: Shenyang Agricultural University. (in Chinese)
- 赵桂玲. 2003. 半干旱地区山杏种质资源调查及遗传特性的研究 [硕士论文]. 沈阳: 沈阳农业大学.
- Zhebentyayeva T N, Reighard G L, Gorina V M, Abbott A G. 2003. Simple sequence repeat (SSR) analysis for assessment of genetic variability in apricot germplasm. *Theor Appl Genet*, 106: 435 - 444.
- Zheng Zhou, Chen Xue-sen, Feng Bao-chun, Liu Huan-fang, Yang Hong-hua. 2004. Studies on the pollination biology of apricot cultivars. *Journal of Fruit Science*, 21 (4): 324 - 327. (in Chinese)
- 郑洲, 陈学森, 冯宝春, 刘焕芳, 杨红花. 2004. 杏品种授粉生物学研究. *果树学报*, 21 (4): 324 - 327.