

姚金保, 杨 丹, 马鸿翔, 等. 小麦戊聚糖研究进展[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(2): 461-467.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.037

小麦戊聚糖研究进展

姚金保, 杨 丹, 马鸿翔, 杨学明, 周森平
(江苏省农业科学院/江苏省农业生物学重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 戊聚糖是小麦籽粒中非淀粉多糖的主要成分。戊聚糖在小麦籽粒中的含量较低,但它对小麦的营养品质和加工品质都有重要的影响。本文综述了近年来国内外关于小麦戊聚糖的最新研究进展,包括小麦品种间戊聚糖含量的变异、戊聚糖的影响因素和遗传特性、戊聚糖与农艺性状关系及戊聚糖对小麦品质的影响等,旨在为中国小麦品质改良提供依据。

关键词: 小麦; 戊聚糖; 品质

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)02-0461-07

Research progress of pentosan in wheat (*Triticum aestivum* L.)

YAO Jin-bao, YANG Dan, MA Hong-xiang, YANG Xue-ming, ZHOU Miao-ping
(*Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Jiangsu Province for Agrobiolology, Nanjing 210014, China*)

Abstract: Pentosans are the major component of non-starch polysaccharides in wheat grain. Pentosans are quantitatively minor constituents of wheat, but they influence the nutritional and end-use quality of grain. This paper summarized the latest research progress in wheat pentosan, including the variation of pentosan content among wheat cultivars, its influencing factors and genetic characteristics, the relationship between pentosans and agronomic traits and the effect of pentosans on wheat quality, so as to provide useful information for wheat quality improvement in China.

Key words: wheat (*Triticum aestivum* L.); pentosan; quality

戊聚糖(Pentosan)也称阿拉伯木聚糖(Arabinoxylan),主要由阿拉伯糖(Arabinose,简称Ara)和木糖(Xylose,简称Xyl)组成,另含有少量的己糖、糖醛酸、酚酸及蛋白质等,它是谷物中非淀粉多糖和细胞壁多糖的重要组成成分。根据溶解性不同将戊聚糖分为水溶性戊聚糖(Water-soluble pentosan,

WSP)和非水溶性戊聚糖(Water-insoluble pentosan, WIP)^[1-2]。水溶性戊聚糖和非水溶性戊聚糖的结构基本相似,不同的是后者分支程度较高,即Ara/Xyl比值较高^[3]。国内外学者对于小麦戊聚糖的研究主要集中在戊聚糖的提取与分离、测定方法、结构、理化性质和功能特性等方面^[4-7]。研究结果表明,尽管戊聚糖在小麦籽粒中的含量较低,但戊聚糖对于小麦磨粉品质、面团流变学特性以及面制品焙烤品质均有十分重要的影响。本研究对近年来国内外报道的有关戊聚糖的测定方法,小麦品种戊聚糖含量,戊聚糖的影响因素和遗传特性,戊聚糖与农艺性状的关系及戊聚糖对小麦品质的影响等方面的研究进展进行综述,旨在为小麦品质育种提供参考。

收稿日期:2014-10-21

基金项目:农业部小麦现代农业产业技术体系(CARS-03);江苏省农业科技自主创新基金项目(CX122026);江苏省科技支撑项目(BE2013439)

作者简介:姚金保(1962-),男,江苏常熟人,硕士,研究员,研究方向为小麦遗传育种。(Tel)13851689603;(E-mail)yaojb@jaas.ac.cn

1 戊聚糖含量

1.1 戊聚糖测定方法

1.1.1 比色法 戊聚糖水解生成戊糖,戊糖脱水生成糠醛,然后与显色剂(地衣酚、间苯三酚)反应,由分光光度计测定吸光值,计算出戊聚糖的含量。根据所用显色剂不同,又分为地衣酚-盐酸法和间苯三酚-冰醋酸法^[8-9]。地衣酚-盐酸法与间苯三酚-冰醋酸法比较,李利民等^[10]认为后者与色谱法相关性较好,而周素梅等^[11]则认为二者所得可溶性戊聚糖含量相似,但后种方法测得总戊聚含量略低,原因是间苯三酚法对不可溶戊聚糖的测定值偏低。与色谱法相比,比色法具有快速简便等特点。

1.1.2 色谱法 首先将样品用酸水解成单糖的形式,然后通过色谱法分离,戊聚糖含量为阿拉伯糖和木糖之和。这种方法的优点是精确度较高,专一性强,但流程复杂、费时、对仪器的要求较高。此外,由于该方法需要预处理,而且绝大多数色谱柱不能完全保留和释放戊聚糖,所以灵敏度也不高。而改进后的离子交换色谱-脉冲安培法,具有极高的灵敏度,同时可以提供其结构特点,并且不需要预处理^[5]。

1.2 戊聚糖含量

不同小麦品种籽粒中戊聚糖含量表现出较大差异。Wootton 等^[12]测定了 19 个澳大利亚和 12 个北美小麦品种的戊聚糖含量,结果发现澳大利亚小麦品种的戊聚糖含量为 5.40% ~ 7.20%,北美小麦品种为 5.50% ~ 6.50%。王修启等^[13]对河南省 9 个主栽小麦品种籽粒的戊聚糖含量进行测定,结果发现戊聚糖含量为 6.25% ~ 8.23%,平均值为 7.33%。冯波等^[14]对 68 份四川小麦区试品系的戊聚糖含量进行分析,参试品系的戊聚糖含量变幅为 4.39% ~ 10.97%,平均值为 5.73%。徐智斌等^[15]测定了 89 份西藏小麦的戊聚糖含量,结果表明,这些品种的戊聚糖含量变化范围为 3.10% ~ 8.95%,戊聚糖含量较高的小麦品种有藏冬 4 号、柳条春和洛隆小麦,戊聚糖含量较低的品种为藏冬 23 号。不同筋力小麦品种的戊聚糖含量表现出较大差异,任霞等^[16]认为强筋小麦品种的戊聚糖和非水溶性戊聚糖含量要比弱筋小麦品种高 10 个百分点,并筛选到戊聚糖含量高于 8.0% 的济南 17、淄麦 12、郑麦 9023 和郑麦 366 等小麦品种。Mohammadkhani^[17]

发现戊聚糖含量在硬粒小麦品种中存在较大的遗传变异,119 个硬粒小麦品种戊聚糖含量的变幅为 2.60% ~ 12.20%。

面粉中的戊聚糖含量较低,约占面粉干基的 2.00% ~ 3.00%。杨梅等^[18]测定了 20 个小麦品种面粉的戊聚糖含量,结果表明,戊聚糖、水溶性戊聚糖和非水溶性戊聚糖含量的变幅分别为 1.86% ~ 3.23%、0.63% ~ 1.51% 和 1.11% ~ 1.87%,3 种戊聚糖的平均含量分别为 2.54%、1.07% 和 1.49%。强筋小麦郑麦 9405 的戊聚糖含量最高,而弱筋小麦品种皖麦 48 和皖麦 47 的戊聚糖含量最低。Sayaslan 等^[19]采用湿磨法分析糯小麦的面粉特性,结果发现糯性小麦面粉中具有比非糯小麦更高的戊聚糖含量。舒守贵等^[20]利用糯小麦杂交后代 BC₃F₂ 回交改良群体研究结果表明,在含有 Wx 基因的所有 8 种基因型中,纯糯型小麦的戊聚糖含量最高。

1.3 影响戊聚糖含量的因素

众多研究结果表明,小麦戊聚糖含量除受品种本身遗传因素的影响外,很大程度上还受环境因素的影响,但彼此间的看法不同。李春喜等^[21]认为,不同品种和不同生态条件下小麦籽粒戊聚糖含量均有很大差异,但环境效应大于品种效应。杨梅等^[22]也证实了戊聚糖含量的环境变异 > 基因型变异 > 基因型与环境互作变异。姜丽娜等^[23]认为无论是总戊聚糖还是水溶性戊聚糖,基因型的影响因素是最重要的,其次是环境和基因型与环境的互作。Hong 等^[24]研究指出,小麦水溶性戊聚糖含量的基因型方差是环境方差的 1.6 倍。因此,通过育种方法改良小麦籽粒中的戊聚糖含量是可行的^[25]。

Coles 等^[26]研究认为,小麦生育后期肥水供应充足、维持较长的光合时间,有利于籽粒戊聚糖积累。氮素对小麦籽粒戊聚糖含量的调控因品种和土壤水分状况而异,栽培措施可能在很大程度上通过影响籽粒千粒质量来调控戊聚糖含量^[27]。小麦籽粒戊聚糖含量与气象因子密切相关,但不同研究者间存在分歧。Salmenkallio-Marttila 等^[28]研究结果表明,在小麦籽粒灌浆期干旱会引起小麦籽粒中戊聚糖含量的下降。Saastamoinen 等^[29]分析了 5 个黑麦品种在 2 年 3 个试点的资料后发现戊聚糖含量与降雨量呈极显著正相关,而与积温呈极显著负相关。王莉芳等^[30]研究结果表明,小麦戊聚糖含量与开花后的降雨量呈极显著负相关,与日照时数和气温呈

极显著和显著正相关。

2 戊聚糖的遗传特性及其与农艺性状、小麦品质的关系

2.1 戊聚糖的遗传特性

小麦戊聚糖含量表现为数量性状的遗传特性。崔文礼等^[31]以郑麦 9405/皖麦 19 F₂群体为材料,测定了 335 个单株籽粒戊聚糖含量,结果发现水溶性戊聚糖含量呈正向偏态分布,而非水溶性戊聚糖含量呈负向偏态分布,推测小麦戊聚糖含量可能存在主基因和微效基因的共同作用。关于小麦戊聚糖含量遗传力的大小也有报道。李春喜等^[32]指出,戊聚糖的遗传力为 87.48%。姜丽娜等^[33]研究认为,小麦籽粒总戊聚糖及水溶性戊聚糖含量的遗传力均较高,分别为 91.00% 和 86.10%,在早代进行选择的可信性较大。李硕碧等^[34]研究结果表明,冬小麦和春小麦水溶性戊聚糖含量的广义遗传力达 95.79%~97.98%,非水溶性戊聚糖含量的广义遗传力较低,为 53.59%~73.99%。

国内外学者采用代换系分析法开展了黑麦和小麦戊聚糖的染色体定位研究。Boros 等^[35]研究结果表明,黑麦的 2R、5R 和 6R 能显著增加水溶性戊聚糖的含量,而 1R、3R、4R 和 7R 会不同程度地降低水溶性戊聚糖的含量。杨培浩等^[36]以普通小麦中国春及其 30 种缺四体为材料,研究结果表明 1D、2B、3B、4B、6A 和 7A 染色体可能携有增加水溶性戊聚糖含量的相关基因,1B 染色体可能携有降低水溶性戊聚糖含量的相关基因;1B、3D、4A 和 7D 染色体可能携有增加非水溶性戊聚糖含量的相关基因,1A、2D 和 6A 染色体上可能携有降低非水溶性戊聚糖含量的相关基因。

近年来,国外学者利用分子标记技术对小麦戊聚糖进行了 QTL 定位。Martinant 等^[37]利用 Courtot/中国春和 Synthetic/Opata 杂交获得的 91 个和 76 个家系为材料,在染色体 1BL 上检测到 1 个与相对黏度和 Ara/Xyl 比值相关的 QTL,可分别解释相对黏度和 Ara/Xyl 比值 32%~37% 和 35%~42% 的遗传变异,位于该 QTL 位点的基因通过调节 Ara/Xyl 比值来控制相对黏度。Li 等^[38]利用 1 套重组自交系群体检测到 7 个控制戊聚糖含量的 QTL 位点,同时检测到 1 个与硬度相关的主效 QTL (Q. Hl.scau-7D),该 QTL 位于与控制戊聚糖含量相同的染

色体上。

2.2 戊聚糖与农艺性状间的关系

有关戊聚糖含量与小麦农艺性状的相关分析报道较少。姜丽娜等^[33]选用 18 个小麦品种作为试验材料,分析了小麦籽粒戊聚糖含量与穗部性状间的关系,结果表明,总戊聚糖含量与穗数、结实小穗数呈显著遗传正相关,水溶性戊聚糖含量与穗粒数、穗粒重呈极显著遗传负相关,与穗数呈极显著遗传正相关。Saastamoinen 等^[29]试验结果表明,戊聚糖含量与千粒质量呈显著负相关。李春喜等^[39]和时侠清等^[40]也证实了戊聚糖含量与千粒质量之间表现为极显著的负相关,并认为这可能是由于戊聚糖主要存在于小麦的麸皮中,籽粒较小的品种相对于籽粒较大的品种,皮层和糊粉层含量相对要高一些的缘故。

2.3 戊聚糖与小麦品质的关系

2.3.1 戊聚糖与籽粒硬度 戊聚糖作为一种细胞壁物质,其特性与小麦籽粒硬度和加工品质有关。常成等^[41]和崔文礼等^[42]研究结果表明,面粉中水溶性戊聚糖含量与籽粒硬度呈极显著和显著正相关。Hong 等^[24]研究结果表明,水溶性、非水溶性和总戊聚糖含量与小麦籽粒硬度均呈极显著正相关。Bettge 等^[7]则认为,戊聚糖对硬质小麦籽粒硬度的影响较小,而对软质小麦籽粒硬度的影响显著。钱森和等^[43]报道,戊聚糖与籽粒硬度的关系受品种来源的影响较大,中国北部冬麦区、黄淮冬麦区和西南冬麦区品种总戊聚糖含量与硬度呈极显著正相关,长江中下游麦区品种总戊聚糖含量与硬度的相关性未达显著水平。

2.3.2 戊聚糖与灰分、白度 戊聚糖在小麦籽粒中的分布具有由内到外逐渐增加的特性,它主要存在于皮层和糊粉层部分,而在胚乳中的含量较少,所以面粉中戊聚糖的含量很好地反映面粉中麸星的含量即面粉的精度。Wang 等^[44]分析了 16 种不同面粉中戊聚糖与灰分间的关系后发现,当灰分含量超过 0.6% 时,总戊聚糖、非水溶性戊聚糖含量与灰分呈极显著正相关。张菊芳等^[45]测定了 20 个冬小麦品种的面粉白度和戊聚糖含量,结果发现两者呈显著的负相关,随着面粉中戊聚糖含量的增加,面粉白度逐渐降低;麸皮中戊聚糖含量与面粉白度呈极显著负相关。郑学玲等^[46]通过对 2 种碾磨精度不同的面粉中戊聚糖与灰分、白度之间的关系的研究,发现

戊聚糖与灰分呈极显著正相关,与白度呈极显著负相关。

2.3.3 戊聚糖与沉淀值 时侠清等^[40]通过对中国北方的 77 小麦品种的戊聚糖含量和沉淀值(SDS)的相关分析,结果表明,两者存在极显著的正相关。冯波等^[14]对 2004~2005 年度四川小麦区试的各参试品系进行了全麦粉的戊聚糖含量和 SDS 沉淀值的相关分析,结果认为两者不具有相关性。徐智斌等^[15]通过对 89 份西藏小麦品种戊聚糖含量和 SDS 沉淀值的测定结果进行了相关性分析,结果也证实两者间不具有相关性。

2.3.4 戊聚糖与蛋白质 戊聚糖与蛋白质含量之间关系的研究较多,但不同研究者的结论不完全一致。Hong 等^[24]认为,蛋白质含量高的硬红春小麦,其水溶性戊聚糖和非水溶性戊聚糖含量也相对较高,小麦籽粒蛋白质含量与水溶性戊聚糖、非水溶性戊聚糖和总戊聚糖含量均呈极显著正相关。但 Shogren 等^[47-48]研究结果表明,水溶性戊聚糖和总戊聚糖含量与蛋白质含量呈显著和极显著负相关。姜丽娜等^[49]试验也证实了蛋白质含量与戊聚糖含量呈负相关,与水溶性戊聚糖含量呈极显著负相关。任霞等^[16]研究结果表明,强筋小麦中水溶性戊聚糖与籽粒蛋白质含量呈正相关,而弱筋小麦中的水溶性戊聚糖与籽粒蛋白质含量呈负相关,这预示水溶性戊聚糖含量对于不同类型的小麦品质可能有不同影响。

2.3.5 戊聚糖与淀粉特性 Arif 等^[50]研究指出,戊聚糖显著影响面粉的糊化特性,与非水溶性戊聚糖相比,水溶性戊聚糖对峰值黏度、稀懈值和反弹值的影响更为明显。张岐军等^[51]认为,戊聚糖与淀粉特性的关系主要体现在水溶性戊聚糖含量与其相关,水溶性戊聚糖含量与峰值黏度、低谷黏度、最终黏度和峰值时间均达极显著负相关。杨梅等^[22]研究也证实了这一结论。水溶性戊聚糖在氧化剂存在时发生氧化凝胶反应,使其在水溶液中形成三维的网状凝胶结构,从而影响到淀粉特性,使淀粉的黏度降低^[52]。

2.3.6 戊聚糖与面团流变学特性 戊聚糖极强的吸水持水特性和氧化凝胶特性对面粉的吸水量和面团流变学特性有重要影响。Shogren 等^[48]研究结果表明,总戊聚糖、水溶性戊聚糖和非水溶性戊聚糖含量与吸水率均呈正相关。张岐军等^[51]也证实了 3

种戊聚糖含量与吸水率皆呈显著正相关。Michniewicz 等^[53]在 4 种不同的面粉中添加一定量的戊聚糖进行粉质试验,结果表明,戊聚糖的加入能显著提高面团的吸水率,延长面团形成时间和稳定时间,从而改善面粉品质。郑学玲等^[54]研究发现,当面粉中戊聚糖含量每增加 1% 时,面团的吸水量大约增加 3%~4%。他们还发现,在面粉中添加不同比例的水溶性戊聚糖,对面团稳定时间影响不一。当添加比例 $\leq 0.5\%$ 时,随着添加比例的增加,稳定时间增加;添加比例超过 0.5% 时,面团稳定时间降低。Vanhamel 等^[55]将黑麦水溶性戊聚糖加入面粉中进行揉混试验,结果发现戊聚糖的加入能显著增加揉混曲线的峰高和面积,面团的吸水率和筋力提高。拉伸试验结果表明,戊聚糖使面团拉伸阻力显著增加、延伸性下降,从而使拉力比的数值大大增加,面筋强度提高^[56]。

2.3.7 戊聚糖与面包品质 戊聚糖对面包焙烤品质的影响与其组成和结构有关,不同成分的戊聚糖对焙烤品质的影响不同。Banu^[57]研究认为,面包体积与水溶性戊聚糖含量呈极显著正相关。Biliaderis^[58]研究结果表明,面粉中加入水溶性戊聚糖不仅使面包体积增大,而且能提高面包的含水量,面包屑更加松软。Michniewicz 等^[59]试验结果表明,在面粉中添加 2% 的水溶性戊聚糖能显著增加面包体积,而添加非水溶性戊聚糖对面包体积影响不明显。Denli 等^[60]试验结果表明,在面粉中添加 0.5%~2.0% 的水溶性戊聚糖或非水溶性戊聚糖均能显著增加面团吸水率和面包体积以及延长面包的货架寿命,其中水溶性戊聚糖的效果较好。郑学玲等^[54]研究结果表明,在强筋小麦豫麦 34 面粉中添加 1% 的水溶性戊聚糖或 0.5% 非水溶性戊聚糖的面包烘焙效果最好、面包体积最大,并且面包的表面状态、内部结构及口感较好。但也有人认为,添加水溶性戊聚糖不会明显增加面包体积,而添加非水溶性戊聚糖的面包体积反而略有下降^[61]。

2.3.8 戊聚糖与饼干、糕点品质 胥红研等^[62]研究指出,中、强筋小麦品种的戊聚糖含量与饼干品质指标相关不显著,弱筋小麦的 3 种戊聚糖含量与饼干直径均呈显著或极显著负相关,而且非水溶性戊聚糖与饼干厚度、饼干直径/厚度分别呈显著正相关和极显著负相关,表明弱筋小麦非水溶性戊聚糖对饼干品质的影响要比水溶性戊聚糖和总戊聚糖含量

的影响更大。Moiraghi 等^[63]利用 51 个来源不同的软质小麦品种研究发现,总戊聚糖和水溶性戊聚糖含量与饼干评分值呈显著负相关。Kaldy 等^[64]选用 29 个软白麦样品为材料,研究戊聚糖对饼干和蛋糕的影响,结果表明,水溶性戊聚糖、总戊聚糖含量与蛋糕体积呈显著负相关,两者对饼干直径也有负向影响。Moiraghi 等^[65]选用来源不同的 38 个软质小麦研究结果表明,戊聚糖含量与蛋糕体积呈显著正相关,而水溶性戊聚糖含量与蛋糕体积相关不显著。

3 展 望

戊聚糖对小麦的磨粉品质、加工品质、面团流变学特性以及面制品烘焙品质等都有重要的影响。戊聚糖含量在不同小麦品种间存在广泛遗传变异。一般而言,强筋小麦品种籽粒中戊聚糖含量要高于弱筋小麦。因此,通过测定现有种质资源、中间材料以及推广品种的戊聚糖含量,有望发掘出一批适合于不同用途的优异种质资源。在小麦品质遗传改良中,可以根据育种目标的需要,选择高或低戊聚糖含量的材料。长江下游麦区是中国唯一的优质弱筋小麦产区,当前生产上推广的弱筋小麦品种的戊聚糖含量仍偏高,因此,如何通过常规育种与现代生物技术相结合的方法来降低小麦品种的戊聚糖含量,减弱面粉的筋力,改善软质小麦的品质是我们小麦育种工作者面临的一个新课题。

参考文献:

- [1] IZYDORCZYK M S, BILIADERIS C G. Cereal arabinoxylans; advances in structure and physicochemical properties [J]. Carbohydrate Polymers, 1995, 28(1): 33-48.
- [2] WANG M, HAMER R J, VLIET T V, et al. Interaction of water extractable pentosans with gluten protein: effect on dough properties and gluten quality [J]. Journal of Cereal Science, 2002, 36(1): 25-37.
- [3] HOSENEY R C. Functional properties of pentosans in baked foods [J]. Food Technology, 1984, 38(1): 114-117.
- [4] GIRHAMMAR U, NAIR B M. Isolation, separation and characterization of water soluble non-starch polysaccharides from wheat and rye [J]. Food Hydrocolloid, 1992, 6(3): 285-299.
- [5] HOUBEN R, DE RUIJTER C F, BRUNT K. Determination of the pentosan content of wheat products by hydrolysis, glucose oxidase treatment and analysis by HPAEC/PAD [J]. Journal of Cereal Science, 1997, 26(1): 37-46.
- [6] REVANAPPA S B, NANDINI C D, SALIMATH P V. Structural characterisation of pentosans from hemicellulose B of wheat varieties with varying chapati-making quality [J]. Food Chemistry, 2010, 119(1): 27-33.
- [7] BETTGE A D, MORRIS C F. Relationships among grain hardness, pentosan fractions, and end-use quality of wheat [J]. Cereal Chemistry, 2000, 72(2): 241-247.
- [8] CERING J, GUILBOT A. A specific for the determination of pentosans in cereals and cereal products [J]. Cereal Chemistry, 1972, 23: 177-184.
- [9] DOUGLAS S G. A rapid method for the determination of pentosans in wheat flour [J]. Food Chemistry, 1981, 7(2): 139-145.
- [10] 李利民, 朱永义, 姚惠源. 谷物中戊聚糖含量测定方法的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2004, 19(6): 76-79, 87.
- [11] 周素梅, 王 璋, 许时婴. 面粉中戊聚糖含量测定方法的探讨[J]. 食品工业科技, 2000, 21(6): 70-72.
- [12] WOOTTON M, ACONE L, WILLS R B H. Pentosan levels in Australian and north American feed wheats [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(2): 389-392.
- [13] 王修启, 李春喜, 林东康, 等. 小麦中的戊聚糖含量及添加木聚糖复酶对鸡表观代谢能值和养分消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2002, 14(3): 57-59.
- [14] 冯 波, 舒守贵, 徐智斌, 等. 四川省区试小麦的戊聚糖含量分析[J]. 西南农业学报, 2006, 19(3): 369-372.
- [15] 徐智斌, 范瑞英, 冯 波, 等. 89 份西藏小麦戊聚糖含量和 SDS 沉淀值的分析[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 831-835.
- [16] 任 霞, 周素梅, 王 强. 不同品种小麦籽粒中戊聚糖含量分析[J]. 核农学报, 2010, 24(6): 1238-1244.
- [17] MOHAMMADKHANI A. Study of pentosans (non starch polysaccharides), in durum wheat and its relation to the quality of protein and grain hardness index (H. I.) [J]. Pakistan Journal of Nutrition, 2005, 4(4): 208-209.
- [18] 杨 梅, 张文明, 姚大年, 等. 20 个小麦品种戊聚糖含量分析[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(2): 283-286.
- [19] SAYASLAN A, SEIB P A, CHUNG O K. Wet-milling properties of waxy wheat flours by two laboratory methods [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(2): 167-178.
- [20] 舒守贵, 孙家柱, 张爱民, 等. 糯小麦回交改良群体中 W_x 基因的遗传和品质效应[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(5): 624-629.
- [21] 李春喜, 邱宗波, 姜丽娜, 等. 河南若干小麦品种籽粒戊聚糖含量的初步研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(5): 1185-1190.
- [22] 杨 梅, 蒲宗君, 郑文寅, 等. 基因型与环境对小麦戊聚糖含量及 RVA 黏度的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 487-492.
- [23] 姜丽娜, 邵 云, 明 红, 等. 基因型和环境对小麦籽粒戊聚糖含量和黏度的影响[J]. 河南农业科学, 2007(1): 17-19.
- [24] HONG B H, RUBENTHALER G L, ALLAN R E. Wheat pentosans. I. Cultivar variation and relationship to kernel hardness [J]. Cereal Chemistry, 1989, 66(5): 369-373.
- [25] LI S B, MORRIS C F, BETTGE A D. Genotype and environment variation for arabinoxylans in hard winter and spring wheats of the

- U. S. pacific northwest [J]. Cereal Chemistry, 2009, 86(1): 88-95.
- [26] COLES G D, HARTUNIAN-SOWA S M, JAMIESON P D, et al. Environmentally-induced variation in starch and non-starch polysaccharide content in wheat [J]. Journal of Cereal Science, 1997, 26(1): 47-54.
- [27] 王莉芳, 姜 东, 戴廷波, 等. 不同栽培措施对小麦籽粒戊聚糖含量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1560-1565.
- [28] SALMENKALLIO-MARTTILA M, HOVINEN S. Enzyme activities, dietary fibre components and rheological properties of wholemeal flours from rye cultivars grown in Finland [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(8): 1350-1356.
- [29] SAASTAMOINEN M, PLAAMI S, KUMPULAINEN J. Pentosan and β -glucan content of finnish winter rye varieties as compared with rye of six other countries [J]. Journal of Cereal Science, 1989, 10(3): 199-207.
- [30] 王莉芳, 戴廷波, 荆 奇, 等. 不同生态点播期对小麦籽粒戊聚糖含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(4): 11-14.
- [31] 崔文礼, 张平治, 张文明, 等. “郑麦 9405/皖麦 19” F_2 植株籽粒中水溶性和非水溶性戊聚糖含量的分布[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(2): 241-245.
- [32] 李春喜, 马守臣, 姜丽娜, 等. 小麦籽粒中植酸、戊聚糖含量及其与相关性状关系的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(4): 706-710.
- [33] 姜丽娜, 邵 云, 张 霞, 等. 小麦籽粒戊聚糖含量及相关遗传特性分析[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(4): 28-31.
- [34] 李硕碧, MORRIS C F, BETTGE A D. 硬质小麦籽粒阿拉伯木聚糖含量的遗传变异研究[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(6): 1016-1022.
- [35] BOROS D, LUKASZEESKI A J, ANIOL A, et al. Chromosome location of genes controlling the content of dietary fibre and arabinoxylans in rye [J]. Euphytica, 2002, 128(1): 1-8.
- [36] 杨培浩, 周立人, 姚大年. 普通小麦基因组中籽粒戊聚糖含量的染色体控制[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 607-611.
- [37] MARTINANT J P, CADALEN T, BILLOT A, et al. Genetic analysis of water-extractable arabinoxylans in bread wheat endosperm [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1998, 97(7): 1069-1075.
- [38] LI M, LIANG H, TANG Z X, et al. QTL analysis for grain pentosans and hardness index in a Chinese 1RS. 1BL \times non-1RS. 1BL wheat cross [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2013, 31(2): 477-484.
- [39] 李春喜, 邱宗波, 姜丽娜, 等. 小麦籽粒中戊聚糖含量的初步研究[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(1): 47-50.
- [40] 时侠清, 刘冬成, 孙家柱, 等. 我国北方冬小麦籽粒中的戊聚糖含量及其相关分析[J]. 核农学报, 2006, 20(3): 225-228.
- [41] 常 成, 张海萍, 李保云, 等. 小麦籽粒发育时期 Puroindolines 蛋白与硬度的关系[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(4): 630-633.
- [42] 崔文礼, 郑文寅, 张文明, 等. 安徽若干小麦品种(系)戊聚糖含量及其与相关性状关系的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(4): 786-790.
- [43] 钱森和, 张 艳, 王德森, 等. 小麦品种戊聚糖和溶剂保持力遗传变异及其与品质性状关系的研究[J]. 作物学报, 2005, 31(7): 902-907.
- [44] WANG M W, SAPIRSTEIN H D, MACHET A S, et al. Composition and distribution of pentosans in millstreams of different hard spring wheats [J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(2): 161-168.
- [45] 张菊芳, 郭文善, 封超年, 等. 小麦籽粒 PPO 活性和戊聚糖含量对面粉白度影响[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(1): 63-66.
- [46] 郑学玲, 李利民, 朱永义, 等. 戊聚糖在小麦中的分布规律及其与灰分、白度相关性的研究[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(6): 19-22.
- [47] SHOGREN M D, HASHIMOTO S, POMERANZ P Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. II. Pentosans and breadmaking characteristics of hard red winter wheat flours [J]. Cereal Chemistry, 1987, 64(1): 35-38.
- [48] SHOGREN M D, HASHIMOTO S, POMERANG Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. IV. Pentosans in wheat flour varieties and fractions [J]. Cereal Chemistry, 1988, 65(3): 182-185.
- [49] 姜丽娜, 李春喜, 邵 云, 等. 小麦籽粒戊聚糖含量及与蛋白质含量关系研究[J]. 江苏农业科学, 2005(2): 35-37.
- [50] ARIF S, ALI T M, ULAFZAL Q, et al. Effect of pentosans addition on pasting properties of flours of eight hard white spring wheat cultivars [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(6): 1066-1075.
- [51] 张岐军, 钱森和, 张 艳, 等. 中国软质小麦品种戊聚糖含量的遗传变异及其与饼干加工品质的关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1734-1738.
- [52] IZYDORCZYK M S, BILIADERIS C G, BUSHUK W. Oxidative gelation studies of water-soluble pentosans from wheat [J]. Journal of Cereal Science, 1990, 11(2): 153-169.
- [53] MICHNIEWICZ J, BILIADERIS C G, BUSHUK W. Effect of added pentosans on some physical and technological characteristics of dough and gluten [J]. Cereal Chemistry, 1991, 68(3): 252-258.
- [54] 郑学玲, 姚惠源, 李利民, 等. 小麦戊聚糖对面团特性及面包烘焙品质的影响[J]. 食品工业科技, 2002, 23(4): 25-27.
- [55] VANHAMEL S, CLEEMPUT G, DELCOUR J A, et al. Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. IV. The effect of high molecular weight water-soluble pentosans on wheat-bread quality in a straight-dough procedure [J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(3): 306-311.
- [56] 许兆明, 朱斌昕, 林 仁. 戊聚糖及其对面粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 1990, 5(3): 19-25.
- [57] BANU L. Baking quality of the rye flour [J]. Agriculture, 2007, 63: 488-492.
- [58] BILIADERIS C G. Effect of arabinoxylans on bread-making quality of wheat flours [J]. Food Chemistry, 1995, 53(2): 165-171.

- [59] MICHNIEWICZ J, BILLADERIS G G, BUSHUK W. Effect of added pentosans on some properties of wheat bread [J]. Food Chemistry, 1992, 43(4): 251-257.
- [60] DENLI E, ERCAN R. Effect of added pentosans isolated from wheat and rye grain on some properties of bread [J]. European Food Research and Technology, 2001, 212: 374-376.
- [61] KIM S K, DAPPOLONIAD B L. Bread staling studies. III. Effect of pentosans of dough, bread and bread staling rate [J]. Cereal Chemistry, 1977, 54(2): 225-229.
- [62] 胥红研, 张 媛, 王海燕, 等. 不同品质类型小麦戊聚糖含量及其与品质的关系[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 613-617.
- [63] MOIRAGHI M, VANZETTI L, BAINOTTI C, et al. Relationship between soft wheat flour physicochemical composition and cookie-making performance [J]. Cereal Chemistry, 2011, 88(2): 130-136.
- [64] KALDY M S, RUBENTHALER G I, KERELIUK G R, et al. Relationships of selected flour constituents to baking quality in soft white wheat [J]. Cereal Chemistry, 1991, 68(5): 508-512.
- [65] MOIRAGHI M, HERA E, DE LA P, et al. Effect of wheat flour characteristics on sponge cake quality [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(3): 542-549.

(责任编辑:袁 伟)