

王昕慧, 刘娟, 李俏, 贺宏, 张智慧, 赵天怡, 李雨童, 蔡婧驰, 张玉红, 潘志芬. 大麦/青稞 β -葡聚糖研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30 (6): 1176-1188

Wang XH, Liu J, Li Q, He H, Zhang ZH, Zhao TY, Li YT, Cai JC, Zhang YH, Pan ZF. Study on barley β -glucan: a review [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2024, 30 (6): 1176-1188

大麦/青稞 β -葡聚糖研究进展

王昕慧¹ 刘娟¹ 李俏¹ 贺宏² 张智慧^{1,3} 赵天怡^{1,4} 李雨童^{1,4} 蔡婧驰^{1,4}
张玉红⁵ 潘志芬^{1✉}

¹中国科学院成都生物研究所 成都 610213

²四川省阿坝州农业科学研究所 马尔康 624000

³四川农业大学 成都 611130

⁴中国科学院大学 北京 100049

⁵西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所 拉萨 850000

摘要 β -葡聚糖广泛存在于燕麦、大麦和小麦等谷物中, 是一种由D-吡喃葡萄糖残基经 β -(1 $\rightarrow$ 4)和 β -(1 $\rightarrow$ 3)键连接而成的线性多聚物, 对谷物加工和人体健康具有重要的影响。青稞即裸大麦, 是青藏高原富有民族特色的主要农作物。就大麦/青稞 β -葡聚糖的分子结构和含量差异及其分子机理、物化特性、生理功能及对加工利用的影响等方面的研究进展进行了梳理。发现近年来关于大麦/青稞 β -葡聚糖的研究大大增加, 已发掘一些影响大麦/青稞 β -葡聚糖含量的关键基因; 发现不同品种的 β -葡聚糖的含量、结构及物化特性存在差异, 并受多种因素影响, 改性可以改变 β -葡聚糖的结构和物化特性, 丰富其功能; β -葡聚糖对大麦/青稞的加工有显著的影响, 同时不同的加工方式显著改变 β -葡聚糖的结构和物化特性。但是, 目前这些研究还不系统、涉及面狭窄、碎片化。未来需加强大麦/青稞 β -葡聚糖提取方法的研究, 提高提取效率和 β -葡聚糖结构完整性保留度; 加强大麦/青稞品种间 β -葡聚糖含量和结构差异的分子机理研究, 为靶向育种提供支撑; 系统深入地研究 β -葡聚糖对谷物加工的影响及其在加工中的变化。(表3 参176)

关键词 β -葡聚糖; 大麦; 青稞; 物化特性; 生理功能; 加工

Study on barley β -glucan: a review

WANG Xinhui¹, LIU Juan¹, LI Qiao¹, HE Hong², ZHANG Zhihui^{1,3}, ZHAO Tianyi^{1,4}, LI Yutong^{1,4},
CAI Jingchi^{1,4}, ZHANG Yuhong⁵ & PAN Zhifen^{1✉}

¹ Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China

² Aba Institute of Agricultural Sciences, Maerkang 624000, China

³ Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁵ Institute of Food Sciences and Technology, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China

Abstract β -Glucan is distributed widely in cereal crops, such as oats, barley, and wheat. It is a linear polysaccharide of β -D-glucopyranosyl residues with β -(1 $\rightarrow$ 4) and β -(1 $\rightarrow$ 3) linkages, and provides significant health benefits and affects barley processing. Hull-less barley, namely naked barley, is a major crop with rich national characteristics on the Qinghai-Xizang plateau. This review focused on the molecular structure, content, and molecular mechanisms of β -glucan biosynthesis from barley grains, as well as the physiological functions, the physical and chemical properties, and the interaction between processing and β -glucan. It was found that the research on barley β -glucan has increased greatly in recent years, and some key genes affecting the content of barley β -glucan have been found; the modification can change the structure and physicochemical properties of β -glucan and enrich its functions, and β -glucan has a significant effect on the processing of barley, at the same time, the structure and physicochemical properties of β -glucan were changed significantly by different processing methods. However, these studies were not systematic and fragmented. In the future, it should be strengthened the study of extraction methods of barley β -glucan to improve the extraction efficiency and the preservation of structural integrity. The molecular mechanism of different β -glucan content and structure among barley cultivars should be strengthened to support the target breeding. The effects of β -glucan on barley

收稿日期 Received: 2024-06-27 接受日期 Accepted: 2024-11-26

第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0303)、西藏科技厅项目(XZ202201ZD0001N)、国家自然科学基金项目(32201847)和四川省自然科学基金项目(24NSFSC6917)资助 Supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0303), Project of the Science and Technology Department of Xizang Autonomous Region (XZ202201ZD0001N), National Natural Science Foundation of China (32201847), and Natural Science Foundation of Sichuan Province (24NSFSC6917)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: panzf@cib.ac.cn)

processing and its changes during the processing should be thoroughly studied to promote a better use of cereal β-glucan.

Keywords β-glucan; barley; hull-less barley; physicochemical property; physiological function; processing

随着生活方式和饮食习惯的改变,人们越来越容易受到各种慢性疾病的困扰,如肥胖、糖尿病、癌症、心脑血管等,这些慢性疾病的发生大多与膳食纤维的摄入较少息息相关^[1].因此,通过膳食直接增加膳食纤维的摄入以减少慢性疾病的发生越来越受到人们的关注和重视.谷物β-葡聚糖是一种半纤维素类物质,在大麦和燕麦籽粒中含量较高,已受到了较广泛的关注和研究^[2].β-葡聚糖是一种具有商业价值的生理活性物质和保健营养成分,在调节许多疾病和机体代谢紊乱等方面都具有突出作用,如降低血浆胆固醇^[3],预防胰岛素抵抗相关疾病^[4-5]以及调节肠道菌群^[6]等.许多国家已将β-葡聚糖列为食品添加剂,并对日常摄入量进行了推荐.美国食品和药品监督管理局(FDA)早在1997年提出,每天食用3 g以上的燕麦β-葡聚糖可降低血清胆固醇水平5%-8%^[7];同时,FDA进一步规定,燕麦和大麦β-葡聚糖能减少患冠心病的风险,扩大其使用范围,除了肉、家禽、幼儿食品及婴儿配方食品外,允许所有食品使用β-葡聚糖作为膨松剂、配方辅助剂、保湿剂、组织成型剂^[8];欧洲食品安全局批复,燕麦β-葡聚糖可作为食品和膳食补充剂,每天食用≥ 3 g能降低心脏病发生的风险;芬兰法理局指出,每100 g食品含5 g燕麦β-葡聚糖有益于降低血脂水平;日本规定,大麦、燕麦β-葡聚糖可用于普通食品、增补剂、宠物食品等功能性标示食品,以此抑制糖分吸收、降低血中胆固醇、调整腹部状况^[9].

随着国内外对谷物β-葡聚糖研究的重视以及在食品中的应用增多,关于β-葡聚糖的综述已有不少报道,但还存在一些内容值得完善.已有的综述常常把谷物、细菌和真菌β-葡聚糖一起进行陈述,但谷物β-葡聚糖和酵母β-葡聚糖的结构和功能有很大的差异.另外,已有的谷物β-葡聚糖相关综述主要是对某一特定谷物或β-葡聚糖的提取、生理功能或应用等某方面进行梳理,关于其分子合成机理方面的综述还未见报道,而且很少关注不同基因型或不同品种的β-葡聚糖的结构、含量或物化特性的差异.此外,β-葡聚糖在加工中的变化或对加工的影响在已有的相关综述中涉及较少.

青稞是我国藏族同胞对裸大麦的尊称,是青藏高原富有民族特色的主要农作物,对我国藏族同胞的生活和文化具有重大影响.大麦/青稞是β-葡聚糖含量较高的作物,而且品种间存在很大的差异.本文在对大麦/青稞β-葡聚糖的结构、含量与分布、物化特性、化学和生物改性、生理功能、提取方法研究的梳理基础上,强调了β-葡聚糖与加工的相互影响,并结合作者课题组系列研究,特别突出了大麦或青稞β-葡聚糖的合成机理及不同基因型的青稞β-葡聚糖差异,以期为谷物尤其是大麦或青稞β-葡聚糖的深入研究和高效应用提供参考.

1 大麦/青稞β-葡聚糖的结构与含量

1.1 β-葡聚糖的结构

大麦β-葡聚糖和其他谷物β-葡聚糖的结构一样,是由D-吡喃葡萄糖通过β-(1→4)和β-(1→3)键连接构成的无分支结构的线性多聚物.D-吡喃葡萄糖残基之间由连续的β-(1→4)键连接,通常每2-3个β-(1→4)键就会被β-(1→3)键分割,从而形成

由数量和比例不同的纤维三糖和纤维四糖.不同来源的β-葡聚糖结构中β-(1→3)糖苷键和β-(1→4)糖苷键的数量和比例及聚合度不同,从而形成其不同的精细结构^[9],主要体现在纤维素二糖(DP3)和纤维素三糖(DP4)的比例、低聚纤维素片段等^[10].β-葡聚糖的结构差异决定了它们不同的物理特性,如水溶性、黏度和凝胶特性等^[11],也决定其在胃肠道中的不同的生理作用^[12].目前,谷物β-葡聚糖分子结构特征研究主要采用酶解法,利用特定的酶如β-D-木聚糖酶、地衣聚糖酶来水解β-葡聚糖,得到主要的水解产物为DP3和DP4^[11,13],并对DP3和DP4进行定量分析.定量分析主要采用高效液相色谱、核磁共振、红外光谱和拉曼光谱等方法,其中,拉曼光谱和核磁共振广泛用于多糖的组成和结构分析^[14].

β-葡聚糖的水解产物除了DP3和DP4外,还存在一定比例(5%-15%)的纤维素寡聚多糖,其中以DP5、DP6和DP9为主^[15].Ryu等研究表明,半柔性的β-(1→4)键链段赋予溶液更大的抗流动性和高黏度特性,而刚性的β-(1→3)链段则增加了链中的扭曲,DP4含量越高,葡聚糖溶液黏度就越大,越有利于其保健作用的发挥^[16].不同谷物的β-葡聚糖DP3:DP4值差异较大(表1),而同种谷物的β-葡聚糖DP3:DP4值随基因型、环境以及籽粒中的分布位置等也有所改变^[17-18].青稞或燕麦糊粉层中的β-葡聚糖的DP3:DP4要高于其胚乳组织^[19],糯青稞β-葡聚糖的DP3:DP4明显高于普通青稞^[13].

β-葡聚糖的形貌特征和分子量大小与其物化特性、加工性能和生理功能关系密切,并受多种因素的影响.β-葡聚糖分子量的大小在不同谷物中差异较大(表1),这不仅与谷物种类、品种和生长环境有关,与分离提取方法(包括溶剂和温度)、纯化手段和测定技术以及提取过程中β-葡聚糖的聚集程度都有关^[17,20].我们研究发现,糯青稞藏青18的分子量(3.10 × 10⁶)比普通青稞藏青2000(2.7 × 10⁶)大,而且藏青18的β-葡聚糖呈现“羊毛状”线性缠绕,表面致密,孔隙较少,藏青2000的β-葡聚糖则呈“珊瑚样”分支结构,表面出现大量的海绵状孔隙^[21].

1.2 β-葡聚糖的含量与分布

β-葡聚糖存在于多种谷物如大麦、燕麦、黑麦等籽粒中,在大麦和燕麦中含量较高(表2).β-葡聚糖含量差异与谷物种类、基因型和环境条件都有关系^[28].糯青稞的β-葡聚糖含量通常高于普通青稞^[21],黑青稞的β-葡聚糖含量高于蓝青稞和白青稞^[29].炎热和干燥的生长条件会增加大麦籽粒中β-葡聚糖的总含量^[30-31],但短时间的高温则会降低其β-葡聚糖含

表1 不同谷物DP3:DP4的比例以及β-葡聚糖的分子量
Table 1 Ratio of DP3:DP4 and the molecular weight of β-glucan in different cereals

谷物种类 Type of grain	DP3:DP4	分子量 Molecular weight (M/10 ³)	参考文献 References
青稞 Hull-less barley	2.74-4.00	126-3100	[21-23]
糯青稞 Waxy	3.02	3100	[22, 24]
燕麦 Oat	2.10-2.40	2000-3000	[22, 25]
小麦 Wheat	3.00-4.50	209-487	[12, 22, 26]
黑麦 Rye	3.00-3.20	21-1100	[12, 27]

量^[32]. 大麦籽粒 β -葡聚糖含量与土壤水分亏缺程度呈负相关, 与成熟期间的气温呈正相关^[33-34].

表2 不同谷物的 β -葡聚糖含量

Table 2 β -glucan content in different grains

谷物籽粒 Cereal grain	β -葡聚糖含量 β -glucan (r/%)	参考文献 References
大麦 Barley	2.00-17.00	[21, 35-37]
燕麦 Oat	2.20-7.80	[38]
小麦 Wheat	0.50-1.50	[38]
黑小麦 Triticale	0.30-1.20	[26]
黑麦 Rye	1.00-2.90	[26]
高粱 Sorghum	1.00	[39]
稻米 Rice	0.60	[39]
玉米 Corn	0.10	[39]

β -葡聚糖在谷物籽粒中的分布因谷物种类不同而有所不同. 小麦 β -葡聚糖主要存于亚糊粉层中^[40-41], 燕麦 β -葡聚糖大多集中在胚乳组织、糊粉层以及亚糊粉层细胞壁中, 其中亚糊粉层占其 β -葡聚糖总量的85%以上^[42], 而大麦 β -葡聚糖主要分布在胚乳细胞壁, 胚乳细胞壁中包含75%的 β -葡聚糖和20%的阿拉伯木聚糖, 而糊粉层细胞壁中包括26%的 β -葡聚糖和67%的阿拉伯木聚糖^[43]. 根据溶解性的不同, β -葡聚糖又分为可溶性和不可溶性部分. 大部分可溶性 β -葡聚糖位于籽粒的内部, 而不溶性 β -葡聚糖含量从外层向胚乳逐渐降低^[44-45].

1.3 大麦/青稞 β -葡聚糖含量差异的分子机理

β -葡聚糖含量由多基因控制, 属于典型的数量性状, 受到遗传和环境因素的影响, 但遗传差异是导致不同材料间 β -葡聚糖含量差异的主要原因^[46-47]. 目前针对 β -葡聚糖含量进行大麦/青稞靶向育种还难以实现, 主要限制因素在于 β -葡聚糖的合成机制尚不明确, 已报道的相关基因或数量性状基因位点 (quantitative trait locus, QTL) 都难以应用于育种实践.

目前有不少大麦 β -葡聚糖含量QTL定位的研究, 但少有基因被进一步克隆. 已发现控制大麦籽粒 β -葡聚糖含量的QTL位点主要分布于1H、2H、5H和7H等染色体上^[48-56]. Han等通过区间作图法, 在大麦Steptoe $\times$ Morex包含150个株系的双单倍体群体 (doubled haploid, DH) 中, 检测到了3个籽粒 β -葡聚糖含量QTLs及6个麦芽 β -葡聚糖含量QTLs, 其中一个大麦籽粒 β -葡聚糖含量QTL位于2H染色体Adh8与ABG019标记之间, 具有较高的表型变异解释率 (9.1%-19.2%)^[48]. 随后, Burton等利用与ABG019紧密连锁的Bmy2标记, 将大麦2H染色体上Adh8与Bmy2之间的序列通过与水稻基因组进行共线性比对, 在水稻7号染色体上定位到一段3.5 Mb的序列^[57]. 在该序列中, 包含一段含有6个类纤维素合成酶样蛋白家族F家系基因 (cellulose synthase-like F, *CsIF*) 的基因簇, 长约118 Kb的序列. *CsI*家族主要参与植物细胞壁多糖形成, 其成员II型糖基转移酶通过其膜嵌入区形成的跨膜通道完成多糖的合成、延伸与分泌^[58-59]. 引人注意的是, *CsIF*基因仅存在于单子叶植物中^[60], 这与 β -葡聚糖主要存在于禾谷类作物中的现象相吻合.

Burton等进一步将水稻的*CsIF2*转入拟南芥中, 检测到了不足1%的 β -葡聚糖^[57], 因此, *CsIF*基因被认定为是编码 β -葡聚糖合成酶的基因. 随后, Doblin等将*CsIH1*转入拟南芥中, 检测到了 β -葡聚糖含量, 证实*CsIH*家族也具有合成 β -葡聚糖的能力^[61]. 除了*CsIF*及*CsIH*家系, 还报道了其他一些影响 β -葡聚糖含量的基因, 如编码 β -葡聚糖水解酶的基因*Glb1*^[48, 62]、控制大麦籽粒皮/裸性状的*NUD*基因^[63]、光响应的相关基因

等^[64-65].

大麦*CsIF*基因家族中的*CsIF6*基因是参与 β -葡聚糖合成的关键基因, *CsIF6*蛋白具有典型的跨膜结构域, 已被证实体外具有合成(1,3;1,4)- β -D-葡聚糖的能力^[66], 多个与 β -葡聚糖含量相关QTL也位于*CsIF6*基因附近^[49-54]. *CsIF6*在大麦多个组织及籽粒发育过程中的转录水平比*CsIF*家系其他基因及*CsIH1*高100-1 000倍^[62, 67-69]. 在水稻、小麦中沉默*CsIF6*或大麦*CsIF6*发生功能突变时, β -葡聚糖不能合成或急剧降低^[55-56, 70], 而当*CsIF6*分别在水稻和小麦中进行过表达时, 又会使 β -葡聚糖含量提高80%-200%^[71-73]. 但近来研究显示, *CsIF6*异常保守, 其DNA序列多态性并不能解释多数大麦 β -葡聚糖含量的差异^[55, 74-75]. 作者课题组对高 β -葡聚糖含量 (9.13%) 糯青稞品种藏青18的*CsIF6*基因序列进行分析, 也未发现与 β -葡聚糖含量相关的多态位点, 但*CsIF6*的转录水平显著升高. 在一个大麦籽粒高 β -葡聚糖含量 (13%) 突变体中, *CsIF6*的转录水平相对野生型反而下降了1 000倍^[68]. Taketa等也发现大麦 β -葡聚糖含量产生差异的主要原因可能不是*CsIF6*的DNA序列差异^[55], 而是来源于大麦籽粒发育过程中的转录调控^[75]. 因此, 我们推测还存在其他关键基因参与调控青稞 β -葡聚糖含量. Li等报道*Waxy*基因功能缺失或降低时会增强大麦植株的胁迫反应生物过程, 特别是增强ABA响应过程, 从而增强大麦籽粒的 β -葡聚糖含量, 并通过RNAi在ABA响应过程中发现*ASR1*基因可能通过调节*CsIF6*基因的表达和 β -葡聚糖合成的底物浓度而改变 β -葡聚糖含量^[76]. β -葡聚糖合成是多基因协同作用的复杂过程, 其合成机制需要进一步深入研究, 挖掘关键基因, 以期为大麦或青稞的靶向育种提供支撑.

2 大麦/青稞 β -葡聚糖的物化特性

2.1 流变学特性

流变学特性是研究生物大分子理化性质的重要参数, 通过多糖流变学特性可以间接地了解多糖的性质, 如多糖在溶液中的构象变化、凝胶特性以及它与其他化合物之间的相互作用等. β -葡聚糖的流变学特性受到多种因素的影响, 包括浓度、分子量大小、品种来源、剪切速率等. β -葡聚糖溶液具有流体的黏性特征和胶体的弹性特征, 低浓度下 β -葡聚糖仅表现出流体的黏性特征, 高 β -葡聚糖浓度溶液随着剪切速率的增大, 体系黏度下降, 形成稳定性良好、弹性和强度高的 β -葡聚糖凝胶, 表现出假塑性流体的特性^[77]. 分子量大的 β -葡聚糖具有明显的弹性特征和较强的增稠能力^[78], 研究表明高分子量 β -葡聚糖 ($M_r > 800 \times 10^3$) 在溶液中形成黏弹性流体 (半固体性质), 而低分子量的 β -葡聚糖 (40×10^3 - 600×10^3) 在溶剂中倾向于形成溶液^[79-80]. 不同来源的谷物 β -葡聚糖也表现出不同的流变学特性, 与燕麦 β -葡聚糖相比, 大麦和小麦的 β -葡聚糖表现出明显的剪切变稀性质, 且随着 β -葡聚糖分子量的增加, 其水溶液流体的黏性变弱而弹性增强^[38]. 此外, 剪切速率与 β -葡聚糖水溶液的表现黏度呈负相关, 即剪切速率越大, 黏度越小, 表现出典型的剪切稀化特征^[81].

2.2 凝胶特性

β -葡聚糖是大分子黏性多糖, 在一定条件下能够形成凝胶而具有增稠的作用, 因此作为食品添加剂被广泛应用于食品中. β -葡聚糖的浓度和分子量的大小能直接影响凝胶的形成, 凝胶性能的好坏受 β -葡聚糖浓度、分子量、pH值、温度、存放时间等因素的影响^[82-83]. 在相对较高的聚合物浓度 (4%-

10%)下, β -葡聚糖溶液能够形成热可逆凝胶网络^[84]。分子量大小与凝胶形成的速率呈负相关、与凝胶的稳定性呈正相关^[85]。研究发现酸水解制备的低分子量大麦葡聚糖溶液在储存时易发生溶胶-凝胶转变^[86],这可能是由于较短的链具有较高的迁移率导致扩散和横向链间缔合的增强^[84, 87-88],而高分子量 β -葡聚糖形成更强的凝胶网络^[89]。不同来源的谷物 β -葡聚糖表现出不同的凝胶化速率。分子量相同的 β -葡聚糖凝胶化速率为燕麦<大麦<小麦,这可能与DP3/DP4摩尔比的增加有关^[88-91]。青稞 β -葡聚糖通过分子间氢键作用发生自然聚集,随着浓度增加和存放时间的延长,其交联区域增加,聚集程度增大,当其浓度增加到100 $\mu\text{g/mL}$ 时会出现网络状聚集结构^[92-93]。多羟基化合物如葡萄糖、果糖、蔗糖等会增加大麦 β -葡聚糖的凝胶形成时间^[94]。

2.3 黏度

β -葡聚糖的黏度主要受谷物来源、浓度、温度以及pH值的影响。青稞麸皮中的 β -葡聚糖的黏度随 β -葡聚糖浓度增大而增加,随温度升高呈下降趋势,在pH 7-10的范围内 β -葡聚糖溶液黏度相对稳定,而低pH使黏度有所下降^[95-96]。这与燕麦 β -葡聚糖溶液的黏度特征比较相似。燕麦 β -葡聚糖浓度越大,溶液中单位体积内分子数越多,分子间形成缠结使溶液的流动阻力增加,从而黏度增加;而温度对燕麦 β -葡聚糖溶液黏度呈先增后减的趋势,低温使燕麦 β -葡聚糖溶液具有凝胶特性,随着温度增加燕麦 β -葡聚糖溶解度增加,60 $^{\circ}\text{C}$ 黏度达到最大,当温度继续增加,溶液分子间相互作用力减弱,溶液的流动阻力下降,导致黏度下降。pH值对燕麦 β -葡聚糖溶液的影响表现为强酸或强碱条件下 β -葡聚糖分子内糖苷键水解,造成黏度下降,中性条件下燕麦 β -葡聚糖溶液黏度则相对稳定^[97-98]。这些因素对 β -葡聚糖的黏度有重要的影响,因此在食品加工和储存过程中需要控制这些条件,以确保 β -葡聚糖的稳定性和功能。

2.4 乳化性和起泡性

乳化性和起泡性是食品体系的两个重要的基本功能特性。目前,食品中的乳化剂大多是蛋白质,但蛋白质易变性的特点限制了其在食品中的应用,因此加强乳化性能、起泡性良好的多糖的研究对其在食品加工中的应用具有重要的作用。 β -葡聚糖具有良好的乳化性和起泡性,并受其浓度、温度、溶液pH值的影响。燕麦 β -葡聚糖浓度越大,黏度越大,降低了油相和水相的不相溶性,有利于乳状液的稳定性^[99]。同样,燕麦 β -葡聚糖起泡性及其稳定性也随浓度增加而增加。温度对不同来源的谷物 β -葡聚糖的乳化性及其稳定性、起泡性及其稳定性的影响不同。例如,在中性条件下大麦 β -葡聚糖在55 $^{\circ}\text{C}$ 时乳化性及其稳定性最好,45 $^{\circ}\text{C}$ 起泡性及其稳定性最好^[99],而燕麦 β -葡聚糖在60 $^{\circ}\text{C}$ 时 β -葡聚糖乳化性最高,20-60 $^{\circ}\text{C}$ 范围内 β -葡聚糖都有好的乳化稳定性,起泡性和泡沫稳定性在40 $^{\circ}\text{C}$ 时最高^[100]。由于 β -葡聚糖为中性多糖分子,中性条件下乳化性能、起泡性及其稳定性最好,而过酸或过碱会导致 β -葡聚糖解聚而黏度下降,从而影响其乳化性和起泡性^[101]。除了控制温度和溶液pH值等外界条件外,对 β -葡聚糖改性也可以提高 β -葡聚糖的乳化性。

3 大麦/青稞 β -葡聚糖的生理功能

大量的研究表明, β -葡聚糖具有多种生理功能,如降低血糖和胆固醇,缓解便秘,降低患大肠癌的风险,产生短链脂肪酸促进肠道益生菌的生长,预防冠心病和糖尿病^[102-105]。大麦

β -葡聚糖能够预防癌症、抗菌、抗病毒,降低胆固醇和血脂,水溶性 β -葡聚糖对冠心病的预防能起到特别突出的作用^[106]。

在近年来的体外研究中发现,谷物 β -葡聚糖降低胆固醇和血糖的原因与这些食品中可溶性 β -葡聚糖的浓度和分子量的大小有关, β -葡聚糖通过增加食品的黏度而发挥有益的生理功能^[107-109]。总的来说,谷物 β -葡聚糖通过增加胃肠道内容物的黏度,减少了脂质的吸收和重吸收,包括胆固醇、胆汁酸及其代谢产物以及延迟胃排空和碳水化合物在肠道的吸收,从而达到预防和延缓慢性疾病的作用,如冠心病^[110-111]、糖尿病、血清胆固醇、餐后高血糖和胰岛素反应^[112-113]、癌症和结肠功能障碍^[114-115]。除此之外,谷物 β -葡聚糖还能影响细胞因子的分泌、炎症相关基因的表达以及细胞的吞噬活性和补体的激活^[116-117]。益生菌和大麦 β -葡聚糖的混合物在调控多种免疫相关基因的转录上表现出协同效应,从而全面增强抗炎作用^[118]。高胆固醇小鼠饲喂含5%青稞 β -葡聚糖的干预饲料后,与未摄入青稞 β -葡聚糖小鼠相比,摄入青稞 β -葡聚糖促进了肠道中总脂质和胆固醇的排泄,同时降低血浆中低密度胆固醇浓度;青稞 β -葡聚糖增加肝脏中胆固醇7- α 羟化酶(CYP7A1)的活性,从而促进胆固醇排泄^[119]。Chen等还报道了 β -葡聚糖在肠内发酵增加了血清中短链脂肪酸的浓度,有利于肝脏脂质代谢^[120]。这些研究结果对研发富含谷物 β -葡聚糖的保健食品和药品具有良好的指导作用。

4 大麦/青稞 β -葡聚糖的提取

大麦/青稞 β -葡聚糖传统的提取方法有热水提取法、碱提法、酶提法、酸提法等(表3),在这些方法中 β -葡聚糖提取率的顺序是热水提取法>酶提法>酸提法>碱提法^[121]。除传统提取方法外,还有一些物理辅助提取方法,如超声提取、微波提取、微波辅助超声提取等(表3),这些方法在 β -葡聚糖的提取方面展现出独特的优势。在实际应用中可以根据原料特性、提取需求以及生产成本等因素综合考虑。同时,提取后的 β -葡聚糖还需进一步的纯化和分析,以确保其质量和纯度。

提取方法对大麦 β -葡聚糖的分子量、溶液行为和结构特征有显著影响,不同的提取方法表现出不同的特性。在热水提取中,随着提取温度从40 $^{\circ}\text{C}$ 升高到95 $^{\circ}\text{C}$, β -葡聚糖的回收率从20%增加到75%^[122-123];但是在高温下,淀粉的糊化和溶解越多,因此纯度往往会降低^[124];水提取方法通常持续很长时间,约7 d^[121],导致大麦 β -葡聚糖的黏度和分子量较低^[125]。碱提取可以将提取水平提高到86%-100%,但会导致大麦 β -葡聚糖分子降解^[122, 125]。微波辅助超声提取的 β -葡聚糖具有较高的分子量(3.415×10^5),超声提取的 β -葡聚糖具有较低的分子量(2.257×10^5);在25-95 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,微波辅助超声提取的表现黏度最高,超声提取的水溶性指数最高(34.18%-88.81%);微波辅助超声提取的 β -葡聚糖泡沫稳定性和乳化性能较强,超声提取的 β -葡聚糖发泡能力较弱^[126]。高速离心-涡旋提取方法使大麦 β -葡聚糖黏度降低,聚集粒径分布变窄,并降低分子量;外源性物理处理并未改变大麦 β -葡聚糖分子的一级结构,但改变了大麦 β -葡聚糖分子间的聚集状态^[127]。

5 大麦/青稞 β -葡聚糖的改性

5.1 化学改性

化学改性方法(如氧化、硫酸化等)常用于改善谷物 β -葡聚糖的理化特性和功能特性,从而改善 β -葡聚糖在食品或医

表3 青稞 β -葡聚糖的提取方法Table 3 Extraction methods of β -glucan of hulless barley

提取方法 Extraction method	提取过程 Extraction proces	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	参考文献 Reference
热水提取 Hot water extraction	乙醇浸泡与干燥→热水提取→酶处理→乙醇沉淀与离心→洗涤与干燥→分级醇沉淀 Ethanol soaking and drying→hot water extraction→enzyme treatment→ethanol precipitation and centrifugation→washing and drying→graded alcohol precipitation	提取条件温和 Mild extraction conditions	提取时间长、溶剂用量大, 纯度和生物活性低, 且淀粉聚合物易一同提取 Long extraction time, a large amount of solvert, low purity and bioactivity, and easily co-extracted with starch polymers	[125, 128-129]
碱提法 Alkali extraction	乙醇预处理→碱液混合→酶解→离心、回收→沉淀与收集→纯化 Ethanol pretreatment→alkali mixture→enzymatic hydrolysis→centrifugation and recovery→precipitation and collection→purification	提取率高 High extraction rate	提取纯度较低, 易形成果胶 Low purity of extraction and easily formed pectin	[130-133]
酶提法 Enzymatic extraction	乙醇回流处理→ α 淀粉酶处理→离心→蛋白酶处理→再次离心→乙醇沉淀→离心与干燥 Refluxing ethanol→ α -amylase→centrifugation n→protease→centrifugation again→ethanol precipitation→centrifugation and drying	提取过程安全、提取率高、纯度高、分子量高 Safe extraction process, high extraction rate, purity, and molecular weight	酶的选择和组合影响提取效果, 且工艺不成熟, 需要添加多种酶, 成本较高 The selection and combination of enzymes affect the extraction, the technology is not well-done and need several enzymes, and the cost is high	[132, 134]
酸提法 Acid extraction	原料处理→酸处理→离心→调节pH值→沉淀与洗涤→干燥和收集 Material handling→acid treatment→centrifugation→pH adjustment→precipitation and washing→drying and collection	提取过程相对温和, 提取率高 Relatively mild extraction process and high extraction rate	提取产品纯度低, 分离难 Low purity of the extracted product and more difficult separation	[135]
超声辅助萃取 Ultrasound-assisted extraction	磨粉→悬浮在去离子水中→超声波处理→控制温度→离心→去除淀粉与蛋白质→离心→乙醇沉淀与冻干 Milling→suspension in deionized water→ultrasonic treatment→temperature control→centrifugation→decontamination of starch and protein→centrifugation→ethanol precipitation and freeze-drying	提取效率高 High extraction efficiency	分子量较低 Low molecular weight	[136]
微波辅助萃取 Microwave-assisted extraction	磨粉→悬浮在去离子水中→微波处理→离心→去除淀粉于蛋白质→离心→乙醇沉淀与冻干 Milling→suspension in deionized water→microwave processing→temperature control→centrifugation→decontamination of starch and protein→centrifugation→ethanol precipitation and freeze-drying	提取效率高, 减少萃取溶剂的消耗 High extraction efficiency and less consumption of extraction solvent	可能导致部分热敏感性成分损失或破坏 Probably resulting in loss or destruction of some heat-sensitive components	[135-137]
微波辅助超声提取 Microwave-assisted ultrasonic extraction	磨粉→悬浮在去离子水中→微波加热预处理→超声波处理→离心→去除淀粉与蛋白质→离心→乙醇沉淀与冻干 Milling→suspension in deionized water→microwave heating pretreatment→ultrasonic treatment→temperature control→centrifugation→decontamination of starch and protein→centrifugation→ethanol precipitation and freeze-drying	提取效率高, 分子量较高, 降低能耗和操作成本 High extraction efficiency and the molecular weight, less energy consumption and cost	操作复杂 Complex operation	[135]
高速离心-涡旋提取方法 High-speed centrifugal-vortex extraction	原料准备→溶剂混合→漩涡处理→高速离心→收集与纯化 Material preparation→solvent mixing→vortex treatment→high speed centrifugation→collection and purification	提取效率高 High extraction efficiency	提取纯度受限, 一定程度破坏结构 Limited purity of extraction product and some damage to its structure	[127]

药等领域的应用效果。 β -葡聚糖化学改性主要是由其结构中的羟基控制, 这些羟基作为其他官能团的连接点, 官能团的连接提供了化学衍生化和改性形式^[138-139]。研究表明, 过氧化氢氧化大麦, 随着过氧化氢浓度从0.2%增至1.0%, β -葡聚糖的纯度由35%增加到70%, 但其分子量显著降至 2.0×10^4 。此外, 经氧化处理后的 β -葡聚糖的黏度下降, 水结合能力降至4.45 g/g, 但油结合能力在0.6%过氧化氢处理下从8.29 g/g增至9.42 g/g; 在不同品种间处理后的糯大麦 β -葡聚糖的分子量、黏度和结合力均高于非糯大麦^[140]。

酸改性是常见的降低多糖分子量的化学改性方法。酸改性方法简单易操作, 但会造成环境污染, 在分子结构方面会

改变分子链的长度^[141]。酸改性常用的酸有抗坏血酸、硫酸、磷酸等。Kivela等研究表明, 在0.6%的大麦 β -葡聚糖溶液中加入0.01 mol/L的硫酸铁和10 mol/L的抗坏血酸(维生素C及脱氢抗坏血酸)后, 大麦 β -葡聚糖的溶液黏度降低约50%, 分子量从 52×10^4 g/mol降低至 35×10^3 g/mol, 而单独硫酸铁处理对其没有影响^[142]。Ames等将含有高抗坏血酸的苹果汁添加到大麦粥中, 其 β -葡聚糖的分子量和黏度显著降低^[143]。青稞 β -葡聚糖经三氧化硫-吡啶($\text{SO}_3\text{-Pyr}$)改性后, 青稞 β -葡聚糖的水溶性增加, 表观黏度和分子量降低, 同时提高了抗氧化活性和体外降血脂活性^[144]。郭欢制备了3种不同取代度(0.11、0.23、0.38)的青稞 β -葡聚糖, 经磷酸化修饰后, 溶解度均有所增

加, 表观黏度均随着剪切速率 ($0.1-100 \text{ S}^{-1}$) 的增加而降低; 与未处理的青稞 β -葡聚糖相比, 中度取代的抗氧化、体外降血脂活性更高^[145]。酸改性不仅改变了 β -葡聚糖的物化特性和生物活性, 为开发新的食品和药物提供了可能, 但改性过程中可能产生一些副作用或毒性, 因此在使用前需要进行充分的安全性和有效性评估。

在羧甲基化改性过程中, 羧甲基基团 (通常来自氯乙酸) 被接枝到纤维或聚合物的分子链上, 通过醚化反应实现, 以改善其功能, 如溶解度、分散性等。 β -葡聚糖的羧甲基化通常使用氯乙酸在2-丙醇溶液或碱水 ($\text{pH} > 12$) 中进行。羧甲基化的活性位点可以是C-2、C-4和C-6碳原子, 取代度可以通过改变氢氧化钠与氯乙酸的比例来控制, 随着取代度的增加, β -葡聚糖从三螺旋结构变为单螺旋结构再变为随机结构^[138, 146]。Guo等研究表明羧甲基化改性对青稞 β -葡聚糖的溶解度、单糖组分的摩尔比、分子量和表观黏度均有显著影响, 改性后具有更高的抗氧化活性和胰脂肪酶抑制活性^[147]。

5.2 生物改性

β -葡聚糖生物改性是通过生物技术来改变其结构和功能特性。在食品工业中, 酶在改变多糖的功能特性方面起着关键作用, 特定的酶被用于解聚、脱支和去酯化。 β -葡聚糖酶作用于 β -葡聚糖, 能降低分子量, 同时 β -葡聚糖解聚对于减少大麦麦芽加工、捣碎或麦芽糖浆生产过程中明显的黏性特征至关重要^[148]。Roubroeks等利用地衣酶 (β -(1- $\rightarrow$ 4)-D-葡聚糖4-葡聚糖水解酶) 对燕麦中的 β -葡聚糖进行部分解聚, 可以使其分子量和特性黏度分别在2 200-213 900 g/mol和7-316 mL/g之间变化, 并使其结构由半柔性链变为无序延伸的螺旋状结构^[149]。生物改性能改善谷物 β -葡聚糖的物化特性及在食品加工中的应用性能, 这些变化使得谷物 β -葡聚糖在医药、食品等领域具有更广阔的应用前景。

6 加工对大麦/青稞 β -葡聚糖的影响

6.1 发芽

青稞或大麦在发芽过程中 β -葡聚糖的含量和性质会发生变化, 包括含量下降、分子量分布变化以及溶解度增加等。青稞或大麦发芽过程中 β -葡聚糖含量明显下降, 下降趋势在发芽的不同阶段表现不同。在发芽前期, β -葡聚糖含量快速减少, 发芽后期下降趋势平缓^[150-152]。水溶性 β -葡聚糖含量在发芽前12 h内急速降低, 下降26.6%, 在12-24 h内下降较缓慢 (降解率为7.55%), 24-48 h下降速度再次加快, 144 h后, 水溶性 β -葡聚糖相对0 h降低了80.06%^[152]。在麦芽形成过程中, β -葡聚糖分子量分布变化较大, 从大麦到麦芽, 累积摩尔质量分布函数证实, $2 \times 10^5 \text{ g/mol}$ 以下的聚合物质量分数增加, 而 $2 \times 10^5 \text{ g/mol}$ 和 $4 \times 10^5 \text{ g/mol}$ 之间的聚合物质量分数减少; 大于 $4 \times 10^5 \text{ g/mol}$ 的 β -葡聚糖中约有14%-16%在发芽过程中没有变化^[153]。

6.2 发酵

发酵会改变谷物 β -葡聚糖的结构及分子量。Xiao等发现大麦发酵后 β -葡聚糖分子量从 1.13×10^5 降至 6.35×10^4 , 发酵后 β -葡聚糖的微观结构从棒状转变为片状, β -(1 $\rightarrow$ 3): β -(1 $\rightarrow$ 4) 的残留范围为1:1.98-1:2.50至1:1.80-1:3.24, 对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和脂肪酶的抑制活性以及在酸性条件下对胆固醇的吸附均有所改善^[154]。Zhang等研究表明大麦经植物乳杆菌 (*L. plantarum* dy-1) 发酵可使大麦 β -葡聚糖的分子量在0-24 h内由 1.05×10^5 降至 4.97×10^4 ^[155]。大麦随着发酵

时间的延长, 清除羟基自由基的活性和总抗氧化能力增强。此外, 大麦 β -葡聚糖的持水和持油性性能显著增强, 6%浓度时大麦 β -葡聚糖的流体黏性行为增强, 弹性减弱。大麦籽粒不同部位的 β -葡聚糖在发酵过程中降解特性不同, 糊粉层的 β -葡聚糖降解比胚乳细胞壁的 β -葡聚糖降解困难, 这可能与各部位 β -葡聚糖的结构不同或与组织中其他组分的结合状态不同有关。

6.3 碾磨、碾削

不同碾磨、碾削方式和程度会影响大麦中 β -葡聚糖的含量、分子量及物化特性。Sullivan等表明碾磨对大麦籽粒 β -葡聚糖含量无显著影响, 从大麦籽粒和去皮大麦中提取的 β -葡聚糖含量分别为3.09 g/100 g和3.49 g/100 g^[156]。Li等研究表明, 用滚轴碾磨出5种不同的成分 (B-1最外层的麸皮、B-2第二层麸皮、B-3第三层麸皮、B-4最里面的麸皮和B-5谷物内芯) 的 β -葡聚糖含量和物化特性都存在显著差异^[157]。B-4部位 β -葡聚糖含量最高 (4.40%), B-1麸皮 β -葡聚糖含量最低 (1.01%); B-5的 β -葡聚糖分子量较高 ($6.48 \times 10^5 \text{ g/mol}$), B-1的 β -葡聚糖分子量较低 ($5.87 \times 10^4 \text{ g/mol}$)。B-5的 β -葡聚糖黏度最高 (0.04-0.37 Pas), B-1的 β -葡聚糖水溶性指数最高 (50.43%-90.71%), B-5的 β -葡聚糖泡沫稳定性和乳化性能较好, 但发泡能力较弱, 而B-1 β -葡聚糖的发泡能力较强。谢蓉等研究表明随着青稞碾削剥皮次数的增加, β -葡聚糖的含量也显著升高, 由1.54%增至4.72%^[158]。此外, 不同磨粉方式对青稞中可溶性 β -葡聚糖的含量有影响。青稞经粉碎机磨粉后可溶性 β -葡聚糖含量增加了16%, 经水磨磨粉后可溶性 β -葡聚糖含量增加了29.50%^[159]。杨春娇等研究发现, 通过皮磨-心磨磨制青稞粉, 粒度越小的面粉的 β -葡聚糖的含量越低, 这可能由于粒度越小的面粉细胞壁组分占比小、淀粉占比大所致^[160]。

6.4 热处理

热处理方法主要包括蒸煮、烘焙、烘烤、挤压膨化、微波处理等, 不同热处理对 β -葡聚糖产生不同的影响。从微观结构来看, 微波焙烤、烘烤和热流态化分别使大球状聚集体分解为小圆块、棒状结构和蜂泡状凝胶网络结构, 从而降低了青稞 β -葡聚糖的分子量和多分散指数, 分别降低了3.68%-90.35%和26.45%-39.83%; 从化学结构来看, 热处理导致 β -葡聚糖的聚合链和 β 糖苷键的断裂, 但未改变 β -葡聚糖的主要官能团; 此外, 热处理提高了 β -葡聚糖的热稳定性和抗氧化活性^[161]。大麦粉经挤压后, β -葡聚糖含量显著增加, 大麦 β -葡聚糖的分子量也明显增加^[162]。焙烤过程中, 面包中的 β -葡聚糖水平显著降低了大约47%-48%^[163]。大麦挤压蒸煮通过淀粉和 β -葡聚糖等大分子的分解产生大量小分子, 导致水溶性指数升高^[164]。但烘烤对 β -葡聚糖含量的影响存在争议, Schlörmann等认为烘烤对大麦 β -葡聚糖的含量无影响^[165]; 王新坤等则认为烘烤可显著增加青稞籽粒全粉中 β -葡聚糖含量, 与未加工处理相比增幅达到14.97%^[166]。对于烘烤等处理方法对 β -葡聚糖含量的影响, 还需要进一步的研究来明确其影响机制和效果。

7 大麦/青稞 β -葡聚糖对加工的影响

7.1 大麦/青稞 β -葡聚糖添加对淀粉加工性能的影响

β -葡聚糖对淀粉加工特性的影响与其浓度、利用方式及淀粉类型有关。大麦 β -葡聚糖可以增加小麦淀粉的糊化黏度、稠度指数, 降低流动行为指数, 随着大麦 β -葡聚糖浓度的增加, 小麦淀粉的溶胀力、溶解度和浸出直链淀粉增加^[167-168]。

Symons和Brennan的研究表明,在小麦粉中加入2.5%和5.0%的大麦 β -葡聚糖,其糊化参数显著下降^[169]。Cleary和Brennen认为,糊化焓的降低是由于大麦 β -葡聚糖链在淀粉颗粒周围形成了网状结构,抑制了淀粉颗粒的膨胀^[170]。Sharma等发现在全麦粉中加入1.50%、3%和4.50%的大麦 β -葡聚糖会导致糊化峰值黏度和最终黏度急剧下降;当 β -葡聚糖浓度从3%增加到4.50%时,糊化曲线没有明显变化^[171]。青稞 β -葡聚糖的添加对青稞淀粉的糊化特性影响很大,而且对糯青稞和非糯青稞的淀粉特性的影响显著不同^[21]。糯青稞淀粉的糊化黏度随着添加的 β -葡聚糖浓度增加而显著下降,但不改变峰值糊化温度; β -葡聚糖的添加对非糯青稞的糊化黏度的影响与对糯青稞的影响趋势一致,同时显著降低淀粉的糊化峰值温度,显著改变淀粉的糊化曲线。

7.2 大麦/青稞 β -葡聚糖对面制品加工的影响

谷物 β -葡聚糖吸水性强,可影响面团的吸水率和吸水时间,同时增加产品的水溶性膳食纤维的含量,影响面团的流变学特性及产品品质等。邓晓青等表明青稞全麦粉饼干体外水解明显比小麦粉饼干慢,产生较高的慢消化淀粉和抗性淀粉,从而产生较低的餐后血糖指数^[172]。Skendi等添加0.20%以上的大麦 β -葡聚糖会逐渐缩短面团成形时间,且面团稳定性随着添加多糖水平的增加而大幅下降;加入0.60%的 β -葡聚糖可以增加面包的体积比,当 β -葡聚糖的添加量进一步提高时,面包的体积比会下降^[173]。青稞 β -葡聚糖可提高小麦粉面团的吸水能力,面包的亮度值却随着 β -葡聚糖水平的升高而显著降低;在低质量的小麦粉中加入 β -葡聚糖比添加到优质面包面粉中能更有效地降低面包的硬度。江丹等研究表明,添加一定量的青稞 β -葡聚糖有利于提高酥性饼干的酥性,在低筋小麦面粉中添加过量的青稞 β -葡聚糖,会削弱面团的强度,导致饼干口感粗糙^[174]。因此, β -葡聚糖的添加量需要根据具体的品质目标进行精确控制。

7.3 大麦/青稞 β -葡聚糖对酿造性能的影响

青稞酿酒过程中, β -葡聚糖对淀粉的包裹作用可延缓或抑制酒曲对淀粉的分解,且其浓度越高抑制效果越明显^[175]。在淀粉中加入 β -葡聚糖会降低大麦醪的过滤速率,但相同浓度 β -葡聚糖的添加对糯青稞淀粉糖化醪的过滤速度影响较小,因为支链淀粉降解快、降解更彻底,从而使得糖化体系中滞留过滤通道的阻塞物少,过滤通道更通畅。因此,Li等发现 β -葡聚糖含量远远高于普通青稞的糯青稞在原麦糖化体系中

有显著的过滤优势,不仅比普通青稞的糖化醪过滤快,甚至远远快于麦芽糖化醪的过滤速度^[21]。如果将糯青稞成功用于原麦酿造,将节约大量的能耗和成本。适量添加 β -葡聚糖对啤酒品质具有积极作用,它能增加啤酒的泡沫与口味的丰满感,能增进口感、提高泡沫的持久性,但过量的 β -葡聚糖会引起雾状浑浊和凝胶沉淀,影响啤酒的澄清度和稳定性^[176]。因此, β -葡聚糖在青稞酿酒过程中具有双重作用,需要控制 β -葡聚糖的添加量,以达到较好酿酒效果。

8 小结与展望

虽然目前对大麦/青稞 β -葡聚糖的结构与含量差异及其分子机理、 β -葡聚糖的提取方法、物化特性、生理功能及应用等方面开展了一些工作,发现大麦/青稞 β -葡聚糖的结构和含量品种间差异不仅与环境因素相关,遗传因素影响更大,目前报道了几个影响 β -葡聚糖含量的基因,但还很难解释品种间 β -葡聚糖含量差异的分子机理,关于影响 β -葡聚糖结构的遗传机理研究几乎未见报道; β -葡聚糖的结构对其物化特性和生理功能起决定作用,目前的提取方法仍然效率低,而且存在分散度很高的 β -葡聚糖混合物,从而影响后续的功能研究及不同结构的 β -葡聚糖形成的分子机理研究; β -葡聚糖的物化特性受其结构、分子量、溶液浓度、温度及pH值等多种因素的影响,而且目前大麦/青稞 β -葡聚糖物化特性的系统研究较少,很难获得在应用中有比较确定的参考价值信息;改性能改善 β -葡聚糖的物化特性、生理功能及在食品加工中的应用性能,但目前的研究也非常有限,目前大麦/青稞 β -葡聚糖通过改性在医药、食品等领域的广阔的应用前景还未得到显著的体现;目前关于大麦/青稞 β -葡聚糖对谷物加工的影响及在加工过程中的变化等方面的研究还不深入、不系统,不利于发挥 β -葡聚糖的功能价值。因此,关于大麦/青稞 β -葡聚糖的研究仍存在一些挑战。(1)进一步优化 β -葡聚糖的提取方法,高效率、产物完整度高的提取方法将加快谷物 β -葡聚糖的研究和利用。(2)加强大麦/青稞 β -葡聚糖品种间含量和结构差异的分子机理研究。目前报道了几个影响 β -葡聚糖含量的基因,但其很难解释品种间 β -葡聚糖含量差异的分子机理, β -葡聚糖合成是多基因协同作用的复杂过程,需进一步挖掘关键基因,为小麦或青稞的靶向育种提供支撑。(3)系统深入研究大麦/青稞 β -葡聚糖的物化特性、改性、对谷物加工的影响及在加工过程中的变化,更利于 β -葡聚糖的功能价值的充分体现。

参考文献 [References]

- Izydorczyk M, Dexter J. Barley β -glucans and arabinoxylans: molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products—a review [J]. *Food Res Int*, 2008, **41** (9): 850-868
- Webster F. Oats: Chemistry and Technology, Second Edition [M]. Guelph: Woodhead Publishing and AACC International Press, 2011: 219-254
- Li Y, Zhu K, Guo X, Peng W, Zhou H. Interaction of barley β -D-glucan with wheat starch: effect on the pasting and rheological properties [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, **92**: 70-76
- Hallfrisch J, Scholfield DJ, Behall KM. Physiological responses of men and women to barley and oat extracts (Nu-trimX). II. Comparison of glucose and insulin responses [J]. *Cereal Chem*, 2003, **80** (1): 80
- Hlebowicz J, Darwiche G, Björgell O, Almér LO. Effect of muesli with 4 g oat β -glucan on postprandial blood glucose, gastric emptying and satiety in healthy subjects: a randomized crossover trial [J]. *J Am Coll Nutr*, 2008, **27** (4): 470-475
- Zhu F, Du B, Xu B. A critical review on production and industrial applications of beta-glucans [J]. *Food Hydrocoll*, 2016, **52**: 275-288
- Whitehead A, Beck EJ, Tosh S, Wolever TM. Cholesterol-lowering effects of oat β -glucan: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Am J Clin Nutr*, 2014, **100** (6): 1413-1421
- 张晖, 蔡秋声. 谷物 β -葡聚糖研究进展[J]. 粮食与油脂, 2010, **5**:

- 3-7 [Zhang H, Cai QS. Research progress on grain β -glucan [J]. *Cereals Oils*, 2010, **5**: 3-7]
- 9 Moschakis T, Lazaridou A, Biliaderis CG. A micro-and macro-scale approach to probe the dynamics of sol-gel transition in cereal β -glucan solutions varying in molecular characteristics [J]. *Food Hydrocoll*, 2004, **42**: 81-91
- 10 Izydorczyk MS, Macri LJ, MacGregor AW. Structure and physicochemical properties of barley non-starch polysaccharides—II. Alkaliextractable β -glucans and arabinoxylans [J]. *Carbohydr Polym*, 1998, **35** (3-4): 259-269
- 11 Lazaridou A, Biliaderis C. Cryogelation of cereal β -glucans: structure and molecular size effects [J]. *Food Hydrocoll*, 2004, **18**(6): 933-947
- 12 Wood PJ, Weisz J, Beer MU, Newman CW, Newman RK. Structure of (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan in waxy and nonwaxy barley [J]. *Cereal Chem J*, 2003, **80** (3): 329-332
- 13 Buliga GS, Brant DA, Fincher GB. The sequence statistics and solution conformation of a barley (1 $\rightarrow$ 3, 1 $\rightarrow$)- β -D-glucan [J]. *Carbohydr Res*, 1986, **157**: 139-156
- 14 Salomonsen T, Jensen HM, Stenbæk D, Engelsen SB. Chemometric prediction of alginate monomer composition: a comparative spectroscopic study using IR, Raman, NIR and NMR [J]. *Carbohydr Polym*, 2008, **72** (4): 730-739
- 15 吴晖, 何平伟, 赖富饶, 闵甜, 张婷, 何嘉敏. 谷物可溶性 (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-葡聚糖结构与生理活性的研究进展[J]. 现代食品科技, 2016, **7**: 283-294 [Wu H, He PW, Lai FR, Min T, Zhang T, He JM. Research progress in the structure and physiological activity of soluble (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan from cereal [J]. *Mod Food Sci Technol*, **7**: 283-294]
- 16 Ryu J, Lee S, You S, Shim J, Yoo SH. Effects of barley and oat β -glucan structures on their rheological and thermal characteristics [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, **89** (4): 1238-1243
- 17 Storsley JM, Izydorczyk MS, You S, Biliaderis CG, Rosnagel B. Structure and physicochemical properties of β -glucans and arabinoxylans isolated from hull-less barley [J]. *Food Hydrocoll*, 2003, **17** (6): 831-844
- 18 Jiang G, Vasanthan T. MALDI-MS and HPLC quantification of oligosaccharides of lichenase-hydrolyzed water-soluble β -glucan from ten barley varieties [J]. *J Agric Food Chem*, 2000, **48** (8): 3305-3310
- 19 刘远方, 赵爱娟. 谷物 β -葡聚糖分子结构、物理特性及应用的研究进展[J]. 食品工业, 2017, **38** (2): 253-256 [Liu YF, Zhao AJ. Research progress of molecular structures, physical properties and applications of cereal β -glucans [J]. *Food Ind*, 2017, **38** (2): 253-256]
- 20 Skendi A, Biliaderis CG, Lazaridou A, Izydorczyk MS. Structure and rheological properties of water soluble β -glucans from oat cultivars of *Avena sativa* and *Avena byzantina* [J]. *J Cereal Sci*, 2003, **38** (1): 15-31
- 21 Li Q, Liu J, Zhai HS, Zhang ZH, Xie R, Xiao F, Zeng X, Zhang Y, Li Z, Pan Z. Extraction and characterization of waxy and normal barley β -glucans and their effects on waxy and normal barley starch pasting and degradation properties and mash filtration rate [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, **302** (4): 12045
- 22 Guo H, Lin S, Lu M, Gong JD, Wang L, Zhang Q, Lin D, QinW, Wu D. Characterization, *in vitro* binding properties, and inhibitory activity on pancreatic lipase of β -glucans from different Qingke (Tibetan hulless barley) cultivars [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, **120**: 2517-2522
- 23 Cho S, Samuel P. Fiber Ingredients: Food Applications and Health Benefits [M]. Florida: CRC Press, 2009: 283-304
- 24 Webster F. Oats: Chemistry and Technology [M]. 2nd ed. Guelph; Woodhead Publishing and AACC International Press, 2011: 77-94
- 25 Wang Q, Ellis PR. Oat β -glucan: physico-chemical characteristics in relation to its blood D -glucose and cholesterol-lowering properties [J]. *Br J Nutr*, 2014, **112** (S2): 4-13
- 26 徐超. 燕麦 β -葡聚糖的体内代谢和抗运动疲劳作用机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013 [Xu C. The metabolic and anti-fatigue effects and mechanisms of Oat β -glucan on endurance exercise-induced fatigue [D]. Xianyang: Northwestern A&F University, 2013]
- 27 Cory AT, Gangola MP, Anyia A, Båga M, Chibbar RN. Genotype, environment and G $\times$ E interaction influence (1,3;1,4)- β -D-glucan fine structure in barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, **97** (3): 743-752.
- 28 Andersson A, Elfverson C, Andersson R, Regné S, Åman P. Chemical and physical characteristics of different barley samples [J]. *J Sci Food Agric*, 1999, **79**: 979-986
- 29 Lin S, Guo H, Gong JD, Lu M, Lu MY, Wang L, Zhang Q, Qin W, Wu DT. Phenolic profiles, β -glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (Tibetan hulless barley) cultivar [J]. *J Cereal Sci*, 2018, **81**: 69-75
- 30 Morgan G, Riggs TJ. Effects of drought on yield and on grain and malt characters in spring barley [J]. *J Sci Food Agric*, 1981, **32** (4): 339-346
- 31 Swanston JS, Ellis RP, Perez-Vendrell A, Voltas J, Molina-Cano JL. Patterns of barley grain development in Spain and Scotland and their implication for malting quality [J]. *Cereal Chem*, 1997, **74** (4): 456-461
- 32 Savin R, Stone PJ, Nicolas ME, Wardlaw IF. Grain growth and malting quality of barley. 1. Effects of heat stress and moderately high temperature [J]. *Crop Pasture Sci*, 1997, **48**: 15-624
- 33 陈锦新, 张国平. 大麦籽粒发育期 β -葡聚糖含量动态及与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2002, **4**: 417-420 [Chen JX, Zhang GP. Dynamics of β -Glucan content during kernel development and its relationship with meteorological factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **4**: 417-420]
- 34 乔海龙, 陈健, 沈会权, 陶红, 臧慧, 陈和. 生态条件对大麦产量及 β -葡聚糖含量的影响[J]. 核农学报, 2012, **26** (1): 107-112 [Qiao HL, Chen J, Shen HQ, Zang H, Chen H. Effect of ecological conditions on yield and β -glucan content of barley [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2012, **26** (1): 107-112]
- 35 Bacic A, Fincher GB, Stone BA. 2009. Chemistry, biochemistry, and biology of (1-3)-(beta)-glucans and related polysaccharides [M]. Amsterdam: Academic Press, 2009: 368
- 36 Munck L, Møller B, Jacobsen S, Søndergaard I. Near infrared spectra indicate specific mutant endosperm genes and reveal a new mechanism for substituting starch with (1 $\rightarrow$ 3,1 $\rightarrow$ 4)- β -glucan in barley [J]. *J Cereal Sci*, 2004, **40** (3): 213-222
- 37 Ehrenbergerová J, Belcredi N, Psota V, Hrstková P, Cerkal R, Newman CW. Changes caused by genotype and environmental conditions in beta-glucan content of spring barley for dietetically beneficial human nutrition [J]. *Plant Foods For Human Nutr*, 2008, **63** (3): 111-117
- 38 赵琼. 燕麦, 小麦, 大麦 β -葡聚糖理化特性及对db/db糖尿病小鼠的调节作用比较[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014 [Zhao Q. Physicochemical properties and regulatory effects on db/db diabetic mice of β -glucans [D]. Xianyang: Northwestern A&F University, 2014]

- 39 何俊. 燕麦 β -葡聚糖的溶液和凝胶特性及其凝胶结构的研究[D]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2009 [He J. Studies on the solution and gel properties and gel structure of oat β -glucan [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2009]
- 40 Fincher GB, Stone B. Cell walls and their components in cereal grain technology [J]. *Adv Cereal Sci Technol*, 1986, **21** (8): 207-295
- 41 Sapirstein HD. Bioactive Encyclopedia of Food Grains [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015: 268-276
- 42 Webster F. Oats: Chemistry and Technology [M]. 2nd ed. Guelph: Woodhead Publishing and AACCC International Press, 2011: 77-94
- 43 王宁, 赵明. 大麦 β -葡聚糖的研究进展[J]. 青海农林科技, 2007 (3): 34-36 [Wang N, Zhao M. Study progress on β -glucan in barley [J]. *Sci Technol Qinghai Agric For*, 2007 (3): 34-36]
- 44 Gajdošová A, Petuláková Z, Havrlentová M, Červená V, Hozová B, Šturdík E, Kogan G. The content of water-soluble and water-insoluble β -D-glucans in selected oats and barley varieties [J]. *Carbohydr Polym*, 2007, **70** (1): 46-52
- 45 Holtekjølén AK, Olsen H, Færgestad EM, Uhlen AK, Knutsen SH. Variations in water absorption capacity and baking performance of barley varieties with different polysaccharide content and composition [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2008, **41** (10): 2085-2091
- 46 Zheng GH, Rossnagel BG, Tyler RT, Bhatti. Distribution of β -glucan in the grain of hull-less barley[J]. *Cereal Chem*, 2000, **77**: 140-144
- 47 张国平, 陈锦新, 汪军妹, 丁守仁. 中国大麦 β -葡聚糖含量的品种和环境变异研究[J]. 中国农业科学, 2002, **35** (1): 6 [Zhang G, Chen J, Wang J, Ding S. Cultivar and environmental variation of β -glucan content in Chinese barleys [J]. *Agric Sci Chin*, 2002, **35** (1): 6]
- 48 Han F, Ullrich SE, Chirat S, Menteur S, Jestin L, Sarrafi A, Hayes PM, Jones BL, Blake TK, Wesenberg DM, Kleinhofs A, Kilian A. Mapping of β -glucan content and β -glucanase activity loci in barley grain and malt [J]. *Theoret Appl Genet*, 1995, **91**: 921-927
- 49 Meyer RC, Swanston JS, Young GR, Lawrence PE, Bertie A, Ritchie J, Wilson A, Brosnan J, Pearson S, Bringham T, Steele G, Aldis PR, Field M, Jolliffe T, Powell W, Thomas W. A genome based approach to improving barley for the malting and distilling industries [J]. *Genetic*, 2000, **8**: 107-114
- 50 Igartua E, Hayes PM, Thomas WT, Meyer R, Mather DE. Genetic control of quantitative grain and malt quality traits in barley [J]. *J Crop Product*, 2002, **5** (1-2): 131-164
- 51 Molina-Cano JL, Moralejo M, Elía M, Muñoz P, Russell JR, Perez-Vendrell AM, Ciudadrell F, Swanson JS. QTL analysis of a cross between European and North American malting barleys reveals a putative candidate gene for β -glucan content on chromosome 1H [J]. *Mol Breed*, 2007, **19**: 275-284
- 52 Li J, Baga M, Rossnagel B, Legge WG, Chibbar RN. Identification of quantitative trait loci for β -glucan concentration in barley grain [J]. *J Cereal Sci*, 2008, **48** (3): 647-655
- 53 Islamović F, Gaco D, Hodžić A, Bajramović E, Peljto M. Determination of fatigue crack growth rate parameters in welded joint [J]. *Techn Technol Educ Manag*, 2012, **7**: 1323-1330
- 54 Kim KS, Diers BW, Hyten DL, Rouf Mian MA, Shannon JG, Nelson RL. Identification of positive yield QTL alleles from exotic soybean germ plasm in two backcross populations [J]. *Theoret Appl Genet*, 2012, **125**: 1353-1369
- 55 Taketa S, Yuo T, Tonooka T, Tsumuraya Y, Inagaki Y, Haruyama N, Larroque O, Jobling SA. Functional characterization of barley β -glucanless mutants demonstrates a unique role for CslF6 in (1,3;1,4)- β -D-glucan biosynthesis [J]. *J Exp Bot*, 2012, **63** (1): 381-392
- 56 Hu G, Burton C, Hong Z, Jackson E. A mutation of the cellulose-synthase-like (CslF6) gene in barley (*Hordeum vulgare* L.) partially affects the beta-glucan content in grains [J]. *J Cereal Sci*, 2014, **59** (2): 189-195
- 57 Burton RA, Wilson SM, Hrmova M, Harvey AJ, Shirley NJ, Medhurst A, Stone BA, Newbigin EJ, Bacic A, Fincher GB. Cellulose synthase-like CslF genes mediate the synthesis of cell wall (1,3;1,4)-beta-D-glucans [J]. *Science*, 2006, **311** (5769): 1940-1942
- 58 Kim SJ, Brandizzi F. Advances in cell wall matrix research with a focus on mixed D-linkage glucan [J]. *Plant Cell Physiol*, 2021, **62**: 1839-1846
- 59 Purushotham P, Ho R, Zimmer J. Architecture of a catalytically active homotrimeric plant cellulose synthase complex [J]. *Science*, 2020, **369** (6507): 1089-1094
- 60 Hazen SP, Scott-Craig JS, Walton JD. Cellulose synthase-like genes of rice [J]. *Plant Physiol*, 2002, **128** (2): 336-340
- 61 Donlin M, Pettolino FA, Wilson SM, Campbell R, Burton R, Fincher G, Newbigin E, Bacici A. A barley cellulose synthase-like CSLH gene mediates (1,3; 1,4)- β -D-glucan synthesis in transgenic *Arabidopsis* [J]. *PNAS*, 2009, **106** (14): 5996-6000
- 62 Burton RA, Jobling SA, Harvey AJ, Shirley NJ, Mather DE, Bacic A, Fincher GB. The genetics and transcriptional profiles of the cellulose synthase-like HvCslF gene family in barley [J]. *Plant Physiol*, 2008, **146** (4): 1821-1833
- 63 Mežaka I, Bleidere M, Legzdina L, Rostoks N. Whole genome association mapping identifies naked grain locus NUD as determinant of β -glucan content in barley [J]. *Zemdirb Agric*, 2011, **98**: 283-292
- 64 Kraemer FJ, Lunde C, Koch M, Kuhn BM, Vicente R. A mixed D-linkage (1,3;1,4)- β -D-glucan specific hydrolase mediates dark-triggered degradation of this plant cell wall polysaccharide [J]. *Plant Physiol*, 2021, **185**: 1559-1573
- 65 Zhang J, Yan L, Liu M, Guo G, Wu B. Analysis of β -D-glucan biosynthetic genes in oat reveals glucan synthesis regulation by light [J]. *Ann Bot*, 2021, **127** (3): 371-380
- 66 Poutanen KS, Kärklund AO, Gómez-Gallego C, Johansson DP, Scheers NM, Marklinder IM, Eriksen AK, Silventoinen PC, Nordlund E, Sozer N, Hanhineva KJ, Kolehmainen M, Landberg R. Grains—a major source of sustainable protein for health [J]. *Nutr Rev*, 2022, **80** (6): 1648-1663
- 67 Burton RA, Fincher GB. (1,3;1,4)- β -D-glucans in cell walls of the Poaceae, lower plants, and fungi: a tale of two linkages [J]. *Mol Plant*, 2009, **2** (5): 873-882
- 68 Christensen U, Scheller HV. Regulation of (1,3;1,4)-beta-D-glucan synthesis in developing endosperm of barley lys mutants [J]. *J Cereal Sci*, 2012, **1**: 55
- 69 Schreiber M, Wright F, Mackenzie K, Hedley P, Schwerdt J, Little A, Burton R, Fincher G, Marshall D, Waugh R, Halpin C. The barley genome sequence assembly reveals three additional members of the CslF (1,3;1,4)- β -glucan synthase gene family [J]. *PLoS ONE*, 2014, **9** (3): 90888
- 70 Tonooka T, Emiko Y, Taketa T, Shin. A novel mutant gene for (1-3,1-4)-beta-D-glucanless grain on barley (*Hordeum vulgare* L.) chromosome 7H [J]. *Breed Sci*, 2009, **59** (1): 47-54
- 71 Burton R, Collins H., Kibble N, Smith J, Shirley N, Jobling S, Henderson M, Singh R, Pettolino F, Wilson S, Bird A, Topping D,

- Bacic A, Fincher G. Over-expression of specific *HvCslF* cellulose synthase-like genes in transgenic barley increases the levels of cell wall (1,3;1,4)- β -D-glucans and alters their fine structure [J]. *Plant Biotechnol J*, 2011, **9** (2): 117-135
- 72 Cseh A, Kruppa K, Molnár I, Rakszegi M, Doležel J, Molnár-Láng M. Characterization of a new 4BS.7HL wheat-barley translocation line using GISH, FISH, and SSR markers and its effect on the beta-glucan content of wheat [J]. *Natl Res Counc Canada*, 2011, **54**: 795-804
- 73 Cseh A, Soós V, Rakszegi M, Türksi E, Balázs E, Molnár-Láng M. Expression of *hvcslf9* and *hvcslf6* barley genes in the genetic background of wheat and their influence on the wheat β -glucan content [J]. *Ann Appl Biol*, 2013, **163**: 142-150
- 74 Cory A, Båga M, Anyia A, Rossmagel BG, Chibbar RN. 2012. Genetic markers for *CslF6* gene associated with (1,3;1,4)- β -glucan concentration in barley grain [J]. *J Cereal Sci*, 2012, **56** (2): 332-339
- 75 Wong SC, Shirley NJ, Little A, Khoo K, Schwerdt J, Fincher G, Burton R, Mather D. Differential expression of the *HvCslF6* gene late in grain development may explain quantitative differences in (1,3;1,4)-beta-glucan concentration in barley [J]. *Mol Breedi*, 2015, **35**: 1-12
- 76 Li Q, Pan ZF, Zhang ZH, Tang HM, Cai JC, Zeng XQ, Li Z. β -Glucan content increase in waxy-mutated barley is closely associated with positive stress responses and is regulated by *ASR1* [J]. *Carbohydr Polym*, 2025, **347**: 122536
- 77 Dongowski G, Drzikova B, Senge B, Blochwitz R, Gebhardt E, Habel A. Rheological behaviour of β -glucan preparations from oat products [J]. *Food Chem*, 2005, **93** (2): 279-291
- 78 张静, 周家春, 黄龙. 不同大麦品种来源 β -葡聚糖流变学特性[J]. 粮食与油脂, 2010 (2): 15-19 [Zhang J, Zhou JC, Huang L. Rheological behavior of β -glucan extracted from different varieties of barley [J]. *Cereals Oils*, 2010 (2): 15-19]
- 79 Andersson A, Arm  o E, Grangeon E, Fredriksson H, Andersson R,   man P. Molecular weight and structure units of (1 $\rightarrow$ 3, 1 $\rightarrow$ 4)- β -glucans in dough and bread made from hull-less barley milling fractions [J]. *J Cereal Sci*, 2004, **40** (3): 195-204
- 80 Borchani C, Fonteyn F, Jamin G, Destain J, Willems L, Paquot M, Blecker C, Thonart P. Structural characterization, technological functionality, and physiological aspects of fungal β -D-glucans: a review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2016, **56** (10): 1746-1752
- 81 Shah A, Gani A, Masoodi F, Wani SM, Ashwar BA. Structural, rheological and nutraceutical potential of β -glucan from barley and oat [J]. *Bioact Carbohydr Dietary Fibr*, 2017, **10**: 10-16
- 82 汪海波, 徐群英, 汪海婴, 刘大川, 谢笔钧. 燕麦 β -葡聚糖的凝胶质构性能研究[J]. 2007, **8**: 114-119 [Wang HB, Zhao M, Wang HY, Liu DC. Study on gelling characteristics of oat β -glucan [J]. *Food Sci*, 2007, **8**: 114-119]
- 83 戴巧玲, 张如, 李琳琳, 吴小燕, 吴佳. 燕麦 β -葡聚糖冷冻凝胶的低场核磁和黏弹性研究[J]. 中国食品学报, 2017, **17** (1): 47-54 [Dai QL, Zhang R, Li LL, Wu XY, Wu J. Study on LF-MNR and viscoelastic properties of oat β -glucan cryo-gel [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2017, **17** (1): 47-54]
- 84 Böhm N, Kulicke WM. Rheological studies of barley (1 $\rightarrow$ 3) (1 $\rightarrow$ 4)- β -glucan in concentrated solution: mechanistic and kinetic investigation of the gel formation [J]. *Carbohydr Res*, 1999, **315** (3-4): 302-311
- 85 Kontogiorgos V, Vaikousi H, Lazaridou A, Biliaderis CG. A fractal analysis approach to viscoelasticity of physically cross-linked barley β -glucan gel networks [J]. *Colloid Surfact B Biointerfa*, 2006, **49** (2): 145-152
- 86 Vaikousi H, Biliaderis CG, Izydorczyk MS. Solution flow behavior and gelling properties of water-soluble barley (1 $\rightarrow$ 3,1 $\rightarrow$ 4)- β -glucans varying in molecular size [J]. *J Cereal Sci*, 2004, **39**: 119-137
- 87 Doublier JL, Wood PJ. Rheological properties of aqueous solutions of (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan from oats (*Avena sativa* L.) [J]. *Cereal Chem*, 1995, **72**: 335-340
- 88 Böhm N, Kulicke WM. Rheological studies of barley (1 $\rightarrow$ 3) (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan in concentrated solution: investigation of the viscoelastic flow behavior in the sol-state [J]. *Carbohydr Res*, 1999, **315**: 293-301
- 89 Lazaridou A, Biliaderis CG, Micha-Screttas M, Steele B. A comparative study on structure-function relations of mixed-linkage (1 $\rightarrow$ 3): (1 $\rightarrow$ 4) linear β -D-glucans [J]. *Food Hydrocoll*, 2004, **18** (5): 837-855
- 90 Tosh SM, Brummer Y, Wood PJ, Wang Q, Weisz J. Evaluation of structure in the formation of gels by structurally diverse (1 $\rightarrow$ 3) (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucans from four cereal and one lichen species [J]. *Carbohydr Polym*, 2004, **57** (4): 249-259
- 91 Tosh SM, Wood PJ, Wang Q, Weisz J. Structural characteristics and rheological properties of partially hydrolyzed oat β -glucans: The effects of molecular weight and hydrolysis method [J]. *Carbohydr Polym*, 2004b, **55** (4): 425-436
- 92 邵舒, 董吉林, 申瑞玲, 孙永敢. 青稞 β -葡聚糖凝胶热特性、动态粘弹性及微观结构研究[J]. 食品工业科技, 2016, **37** (3): 54-57 [Shao S, Dong JL, Shen RL, Sun GY. Study on the thermal property, dynamic viscoelasticity and microstructure of hullless barley β -glucan gel [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, **37** (3): 54-57]
- 93 Kwong MG, Wolever TMS, Brummer Y, Tosh SM. Attenuation of glycemic distribution [J]. *Food Funct*, 2013, **4** (3): 401-408
- 94 Irakli M, Biliaderis CG, Izydorczyk MS, Papadoyannis IN. Isolation, structural features and rheological properties of water-extractable β -glucans from different Greek barley cultivars [J]. *J Sci Food Agric*, 2004, **84** (10): 1170-1178
- 95 贾莹. 青稞麸皮水溶性 β -葡聚糖的提取, 分离纯化和性质研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013 [Jia Y. Extraction, purification and characterization of water-soluble β -glucan from highland barley bran [D]. Shanghai: East China University of Science & Technology, 2013]
- 96 曾青梅. 黑青稞 β -葡聚糖提取纯化及其性质研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024 [Zeng QM. Study on extraction, purification and properties of β -glucan from black highland barley [D]. Mianyang: Southwestern University of Science & Technology, 2024]
- 97 董吉林, 郑坚强, 申瑞玲. 燕麦 β -葡聚糖的黏性及其在冰淇淋中的应用[J]. 食品研究与开发, 2007, **28** (7): 193-196 [Dong JL, Zheng JQ, Shen RL. Application of Oat β -glucan in ice cream production [J]. *Food Res Dev*, 2007, **28** (7): 193-196]
- 98 申瑞玲, 王志瑞, 李宏全, 董吉林, 李文全, 王文魁. 燕麦 β -葡聚糖对高胆固醇血症大鼠血脂和生长的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, **24** (1): 44-48 [Shen RL, Wang ZR, Li HQ, Dong JL, Li WQ, Wang WK. Effects of OAT β -glucan on blood lipids and growth in hypercholesterolemic rats [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2009, **24** (1): 44-48]
- 99 Temelli F. Extraction and functional properties of barley β -glucan as affected by temperature and pH [J]. *J Food Sci*, 1997, **62** (6): 1194-1201
- 100 申瑞玲, 董吉林, 姚惠源, 王章存. 燕麦胶的乳化性和起泡性研

- 究[J]. 中国粮油学报, 2007, **6**: 55-57 [Shen RL, Dong JL, Yao HY, Wang ZC. Emulsion and Foam Properties of Oat Gum [J]. *J Chin Cereals Oil*, 2007, **6**: 55-57]
- 101 Li Y, Zhu K, Guo X, Peng W, Zhou H. Interaction of barley β -D-glucan with wheat starch: Effect on the pasting and rheological properties [J]. *Intl J Biol Macromol*, 2016, **92**: 70-76
- 102 Xu C, Lü J, Lo YM, Cui SW, Hu X, Fan M. Effects of oat β -glucan on endurance exercise and its anti-fatigue properties in trained rats [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, **92** (2): 1159-1165
- 103 张培培. 燕麦 β -葡聚糖对大鼠肠道微环境和机体能量代谢的影响 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010 [Zhang BB. Effects of Oat β -glucan on microenvironment of intestine and body metabolish of rats [D]. Xianyang: Northwestern A&F University, 2010]
- 104 Hallfrisch J, Scholfield DJ, Behall KM. Physiological responses of men and women to barley and oat extracts (Nu-trimX). II. Comparison of glucose and insulin responses [J]. *Cereal Chem*, 2003, **80** (1): 80
- 105 Hlebowicz J, Darwiche G, Björgell O, Almér LO. Effect of muesli with 4 g oat β -glucan on postprandial blood glucose, gastric emptying and satiety in healthy subjects: a randomized crossover trial [J]. *J Am Coll Nutr*, 2008, **27** (4): 470-475
- 106 乔海龙, 杨启东, 陈健, 沈会权, 陈晓静, 陶红, 臧慧, 陈和. 大麦 β -葡聚糖的研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2012, **40** (1): 4-7 [Qiao HL, Yang QD, Chen J, Sheng H, Chen X, Tao H, Zang H, Chen H. Research status and prospect of β -glucan in barley [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2012, **40** (1): 4-7]
- 107 Wolever TM, Tosh SM, Gibbs AL, Brand-Miller J, Duncan AM, Hart V, Lamarche B, Thomson BA, Duss R, Wood PJ. Physicochemical properties of oat β -glucan influence its ability to reduce serum LDL cholesterol in humans: a randomized clinical trial [J]. *Am J Clin Nutr*, 2010, **92** (4): 723-732
- 108 Tosh SM, Brummer Y, Wolever TM, Wood PJ. Glycemic response to oat bran muffins treated to vary molecular weight of β -glucan [J]. *Cereal Chem*, 2008, **85** (2): 211-217
- 109 Regand A, Chowdhury Z, Tosh SM, Wolever TM, Wood P. The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility [J]. *Food Chem*, 2011, **129** (2): 297-304
- 110 Liu S, Manson JE, Stampfer MJ, Rexrode KM, Hu FB, Rimm EB, Willett WC. Whole grain consumption and risk of ischemic stroke in women: a prospective study [J]. *J Am Med Assoc*, 2000, **284** (12): 1534-1540.
- 111 Truswell A. Cereal grains and coronary heart disease [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2002, **56** (1): 1
- 112 Gunness P, Gidley MJ. Mechanisms underlying the cholesterol-lowering properties of soluble dietary fibre polysaccharides [J]. *Food Funct*, 2010, **1** (2): 149-155
- 113 Wood PJ. Cereal β -glucans in diet and health [J]. *J Cereal Sci*, 2007, **46** (3): 230-238
- 114 Meyer KA, Kushi LH, Jacobs DR, Slavin J, Sellers TA, Folsom AR. Carbohydrates, dietary fiber, and incident type 2 diabetes in older women [J]. *Am J Clin Nutr*, 2000, **71** (4): 921-930
- 115 Sudha M, Vetrimani R, Leelavathi K. Influence of fibre from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality [J]. *Food Chem*, 2007, **100** (4): 1365-1370
- 116 Chanput W, Reitsma M, Kleinjans L, Mes JJ, Savelkoul HF, Wichers HJ. B-glucans are involved in immune-modulation of THP-1 macrophages [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2012, **56** (5): 822-833
- 117 Rieder A, Grimmer S, Kolset SO, Michaelsen TE, Knutsen SH. Cereal β -glucan preparations of different weight average molecular weights induce variable cytokine secretion in human intestinal epithelial cell lines [J]. *Food Chem*, 2011, **128** (4): 1037-1043
- 118 Arena MP, Russo P, Capozzi V, Rascón A, Felis GE, Spano G, Fiocco D. Combinations of cereal β -glucans and probiotics can enhance the anti-inflammatory activity on host cells by a synergistic effect [J]. *J Funct Foods*, 2016, **23**: 12-23
- 119 Tong LT, Zhong K, Liu L, Zhou X, Qiu J, Zhou S. Effects of dietary hull-less barley β -glucan on the cholesterol metabolism of hypercholesterolemic hamsters [J]. *Food Chem*, 2015, **169**: 344-349
- 120 Chen H, Nie Q, Xie M, Yao H, Zhang K, Yin J, Nie S. Protective effects of β -glucan isolated from highland barley on ethanol-induced gastric damage in rats and its benefits to mice gut conditions [J]. *Food Res Int*, 2019, **122**: 157-166
- 121 Maheshwari G, Sowrirajan S, Joseph B. Extraction and isolation of beta-glucan from grain sources-a review [J]. *J Food Sci*, 2017, **82** (7): 1535-1545
- 122 Beer MU, Wood PJ, Weisz J. Molecular weight distribution and (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)-beta-D-glucan content of consecutive extracts of various oat and barley cultivars [J]. *Cereal Chem*, 1997, **74** (4): 476-480
- 123 Storsley JM, Izydorczyk MS, You S, Biliaderis CG, Rossnagel B. Structure and physicochemical properties of β -glucans and arabinoxylans isolated from hull-less barley [J]. *Food Hydrocoll*, 2003, **17** (6): 831-844
- 124 Comino P, Shelat K, Collins H, Lahnstein J, Gidley MJ. Separation and purification of soluble polymers and cell wall fractions from wheat, rye and hull less barley endosperm flours for structure-nutrition studies [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, **61** (49): 12111-12122
- 125 Saulnier MG, Langley DR, Kadow JF, Senter PD, Knipe JO, Tun MM, Vyas DM, Doyle TW. Synthesis of etoposide phosphate, BMY-40481: a water-soluble clinically active prodrug of etoposide [J]. *Bioor Med Chem Lett*, 1994, **4** (21): 2567-2572
- 126 Liu H, Li Y, You M, Liu X. Comparison of physicochemical properties of β -glucans extracted from hull-less barley bran by different methods [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, **182**: 1192-1199
- 127 Zhao Y, Zhou HM, Huang ZH, Zhao RY. Different aggregation states of barley β -glucan molecules affects their solution behavior: a comparative analysis [J]. *Food Hydrocoll*, 2020, **101**: 105543
- 128 Yuan C, Hu R, He L, Hu J, Liu H. Extraction and prebiotic potential of β -glucan from highland barley and its application in probiotic microcapsules [J]. *Food Hydrocoll*, 2023, **139**: 108520
- 129 Papageorgiou M, Lakjdara N, Lazaridou A, Biliaderis CG, Izydorczyk MS. Water extractable(1 $\rightarrow$ 3,1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucans from barley and oats: an intervari-etal study on their structural features and rheological behaviour [J]. *J Cereal Sci*, 2005, **42** (2): 213-224
- 130 Rong Y, Xu N, Xie B, Hao J, Yi L, Cheng R, Li D, Linhardt RJ, Zhang Z. Sequencing analysis of β -glucan from highland barley with high performance anion exchange chromatography coupled to quadrupole time -of- flight mass spectrometry [J]. *Food Hydrocoll*, 2017, **73**: 235-242
- 131 陈红歌, 赵玮莉, 赵柏叶, 刘畅, 贾新成. 从脱壳大麦中提取和纯化 β -葡聚糖的研究[J]. 食品与发酵工业, 2005, **2**: 45-47 [Chen HG,

- Zhao WL, Liu C, Jia XC. Extraction and Purification of β -glucan from hulled barley [J]. *Food Ferment Ind*, 2005, **2**: 45-47]
- 132 Mishra N, Mishra N, Mishra P. Influence of different extraction methods on physicochemical and biological properties of β -glucan from indian barley varieties [J]. *Carpathian J Food Sci Technol*, 2020, **12** (1): 27-39
- 133 连喜军, 张平平, 罗庆丰. 西藏青稞中 β -葡聚糖提取的研究[J]. 天津农学院学报, 2005, **12** (4): 25-27 [Lian XJ, Zhang PP, Luo QF. Study on extraction of β -glucan from barley in Tibet [J]. *J Tianjin Agric Coll*, 2005, **12** (4): 25-27
- 134 Ahmad A, Anjum FM, Zahoor T, Nawaz H, Din A. Physicochemical and functional proper ties of barley β -glucan as affected by different extraction procedures [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2009, **44**: 181-187
- 135 Ahluwalia BB, Ellis EE. A rapid and simple method for the determination of starch and β -glucan in barley and malt [J]. *J Inst Brew*, 1984, **90**: 254-259
- 136 Liu Y, Wu Q, Wu X, Algharib SA, Gong F, Hu J, Luo W, Zhou M, Pan Y, Yan Y, Wang Y. Structure, preparation, modification, and bioactivities of β -glucan and mannan from yeast cell wall: a review [J]. *Int J Biol Macromol*. 2021, **173**: 445-456
- 137 Benito-Román Ó, Alonso E, Cocero MJ. Pressurized hot water extraction of beta-glucans from waxy barley [J]. *J Supercrit Flu*, 2013, **73**: 120-125
- 138 Ahmad NH, Mustafa S, Man YB. Microbial polysaccharides and their modification approaches: a review [J]. *Int J Food Propert*, 2014, **18** (2): 332-347
- 139 Zeković D, Kwiatkowski S, Vrić M, Jakovljević D, Moran CA. Natural and modified (1 $\rightarrow$ 3)- β -D-glucans in health promotion and disease alleviation [J]. *Crit Rev Biotechnol*, 2005, **25** (4): 205-230
- 140 Lee SH, Jang GY, Kim MY, Hwang IG, Kim HY, Woo KS, Lee MI, Kim TJ, Lee J, Jeong HS. Physicochemical and in vitro binding properties of barley β -glucan treated with hydrogen peroxide [J]. *Food Chem*, 2016, **192**: 729-735
- 141 秦英英. 燕麦 β -葡聚糖的化学改性及其生理活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020 [Qin YY. Chemical modification and physiological activity of oat β -glucan [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020]
- 142 Kivelä R, Gates F, Sontag-Strohm T. Degradation of cereal beta-glucan by ascorbic acid induced oxygen radicals [J]. *J Cereal Sci*, 2009, **49** (1): 1-3
- 143 Ames N, Storsley J, Tosh S. Effects of processing on physicochemical properties and efficacy of β -glucan from oat and barley [J]. *Cereal Foods World*, 2015, **60**: 195-204
- 144 Guo H, Li HY, Liu L, Wu CY, Liu H, Zhao L, Zhang Q, Liu Y-T, Li SQ, Qin W, Wu DT. Effects of sulfated modification on the physicochemical properties and biological activities of β -glucans from Qingke (Tibetan hulless barley) [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, **141**: 41-50
- 145 郭欢. 青稞 β -葡聚糖的提取分离、结构表征、化学修饰及其生物活性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2020 [Guo H. Extraction, isolation, structural characterization, chemical modification, and biological activities of QingKe (*Hordeum vulgare* L.) β -glucans [D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2020]
- 146 Kogan G. (1 $\rightarrow$ 3,1 $\rightarrow$ 6)- β -D-glucans of yeasts and fungi and their biological activity [J]. *Stud Nat Prod Chem*, 2000, **23**: 107-152
- 147 Guo H, Feng KL, Zhou J, Liu L, Wu DT. Carboxymethylation of qingke β -glucans and their physicochemical properties and biological activities [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, **147**: 200-208
- 148 McCleary BV. Enzymatic modification of plant polysaccharides [J]. *Int J Biol Macromol*, 1986, **8**: 349-354
- 149 Roubroeks, J Andersson R, Mastromauro D, Christensen B Åman P. Molecular weight, structure and shape of oat (1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan fractions obtained by enzymatic degradation with (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan 4-glucanohydrolase from *T richoderma reesei* [J]. *Carbohydr Polym*, 2001, **46** (3): 275-285
- 150 张树亮, 王越, 安家彦. 制麦过程中麦芽 β -葡聚糖与还原糖含量的变化[J]. 食品研究与开发, 2014, **35** (15): 87-89 [Zhang SL, Wang Y, An JY. Content changes of malt β -glucan and reducing sugar in the process of malting [J]. *Food Res Dev*, 2014, **35** (15): 87-89]
- 151 唐珊珊, 顾楠, 潘志芬, 李健, 李俏, 邓光兵, 龙海, 赵国华, 余懋群. 青稞发芽过程中 β -葡聚糖含量变化及对麦芽品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (4): 616-622 [Tang SS, Gu N, Pan ZF, Li J, Li Q, Deng GB, Long H, Zhao GH, Yu MQ. Changes in β -glucan content of hull-less barley during germination and the effects on malt quality [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (4): 616-622]
- 152 翟会生. 青稞发芽过程中功能组分含量的变化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016 [Zhai HS. Dynamic changes of functional component content in hull-less barley during germination [D]. Beijing: Chinese University of Academy Science, 2016]
- 153 Marconi O, Tomasi I, Dionisio L, Perretti G, Fantozzi P. Effects of malting on molecular weight distribution and content of water-extractable β -glucans in barley [J]. *Food Res Int*, 2014, **64**: 667-682
- 154 Xiao X, Tan C, Sun X, Zhao Y, Zhang J, Zhu Y, Bai J, Zhou X. Effects of fermentation on structural characteristics and *in vitro* physiological activities of barley β -glucan [J]. *Carbohydr Polym*, 2019, **231**: 115685
- 155 Zhang J, Wang P, Tan C, Zhao Y, Zhu Y, Bai J, Xiao X, Zhang L, Teng D, Tian J, Liu L, Zhang H. Effects of l plantarum dy-1 fermentation time on the characteristic structure and antioxidant activity of barley β -glucan *in vitro* [J]. *Curr Res Food Sci*, 2022, **5**: 125-130
- 156 Sullivan P, O'Flaherty J, Brunton N, Gee VL, Arendt E, Gallagher E. Chemical composition and microstructure of milled barley fractions [J]. *Eur Food Res Technol*, 2009, **230** (4): 579-595
- 157 Li Y, You M, Liu H, Liu X. Comparison of distribution and physicochemical properties of β -glucan extracted from different fractions of highland barley grains [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, **189**: 91-99
- 158 谢容, 李俏, 张云书, 张跃雁, 肖富彤, 张玉红, 潘志芬. 不同剥皮次数对青稞米品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 971-981 [Xie R, Li Q, Zhang YS, Zhang YY, Xiao FT, Zhang YH, Pan ZF. Effect of different peeling Times on the quality of hull-less barley rice [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 971-981]
- 159 农彦彦, 冯才敏, 吴子瑜, 钟立维. 青稞酥饼加工工艺及其对 β -葡聚糖的影响[J]. 粮油食品科技, 2018, **26** (2): 6-10 [Nong YY, Feng CM, Wu ZY, Zhong LW. Processing technology of highland barley pastry and impacts on β -glucan [J]. *Sci Technol Cereals Oils Foods*, 2018, **26** (2): 6-10]
- 160 杨春娇, 肖富彤, 李俏, 赵天怡, 张智慧, 陈多, 张玉红, 潘志芬. 3个青稞品种不同粒度面粉和面条的品质差异[J]. 应用与环境生物学报, **30** (5): 1-11 [Yang CJ, Xiao FT, Li Q, Zhao TY, Zhang ZH, Chu D, Zhang YH, Pan ZH. The differences of flour and noodles quality with different particle sizes for three highland barley varieties [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (5): 1-11]
- 161 Bai YP, Zhou HM, Zhu KR, Li Q. Effect of thermal processing on the molecular, structural, and antioxidant characteristics

- of highland barley β -glucan [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, **271**: 118416
- 162 Honcú I, Sluková M, Vaculová K, Sedláčková I, Wiege B, Fehling E. The effects of extrusion on the content and properties of dietary fibre components in various barley cultivars [J]. *J Cereal Sci*, 2016, **68**: 132-139
- 163 Tiwari U, Cummins E, Sullivan P, Flaherty JO, Brunton N, Gallagher E. Probabilistic methodology for assessing changes in the level and molecular weight of barley β -glucan during bread baking [J]. *Food Chem*, 2011, **124** (4): 1567-1576
- 164 Lee S, Inglett GE. Functional characterization of steam jet-cooked β -glucan-rich barley flour as an oil barrier in frying batters [J]. *J Food Sci*, 2006, **71** (6): 308-313
- 165 Schlörmann W, Zetzmann S, Wiege B, Haase N, Greiling A, Lorkowski S, Dawczynski C, Gleis M. Impact of different roasting conditions on chemical composition, sensory quality and physicochemical properties of waxy-barley products [J]. *Food Funct*, 2019, **10** (9): 5436-5445
- 166 王新坤, 刘超, 杨清梅, 程安玮, 王月明, 王青, 孙金月. 青稞籽粒 β -葡聚糖含量及不同加工方式对其变化的影响[J]. 山东农业科学, 2019, **51** (2): 124-130 [Wang XK, Liu C, Yang QC, Chen AW, Wang YM, Wang Q, Sun JY. Beta glucan content in highland barley grains and its change influenced by different processing methods [J]. *Shandong Agric Sci*, 2019, **51** (2): 124-130]
- 167 Li Y, Zhu K, Guo X, Peng W, Zhou H. Interaction of barley β -D-glucan with wheat starch: effect on the pasting and rheological properties [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, **92**: 70-76
- 168 Liu Y, Bailey TB, White PJ. Individual and interactional effects of β -glucan, starch, and protein on pasting properties of oat flours [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, **58** (16): 9198-9203
- 169 Symons LJ, Brennan CS. The effect of barley β -glucan fiber fractions on starch gelatinization and pasting characteristics [J]. *J Food Sci*, 2004, **69** (4): 257-261
- 170 Cleary L, Brennan C. The influence of a (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan rich fraction from barley on the physico-chemical properties and *in vitro* reducing sugars release of durum wheat pasta [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2006, **41** (8): 910-918
- 171 Sharma P, Gujral HS. Cookie making behavior of wheat-barley flour blends and effects on antioxidant properties [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2014, **55** (1): 301-307
- 172 邓晓青, 潘志芬, 李俏, 唐亚伟, 张玉红, 邓光兵, 龙海, 尼玛扎西, 余懋群. 青稞全麦粉与面粉及其饼干的品质研究[J]. 麦类作物学报, 2019, **39** (1): 120-126 [Deng XQ, Pan ZF, Li Q, Tang YW, Zhang YH, Deng GB, Long H, Nimazhaxi, Yu MQ. Quality characterization of wholegrain, flour and cookies from hulless barley [J]. *J Trit Crops*, 2019, **39** (1): 120-126]
- 173 Skendi A, Biliaderis CG, Papageorgiou M, Izidorczyk MS. Effects of two barley β -glucan isolates on wheat flour dough and bread properties [J]. *Food Chem*, 2010, **119** (3): 1159-1167
- 174 江丹, 陈阳, 宋庭宁, 袁咏红, 陈志元, 孙代华. 响应面分析法优化高含量青稞 β -葡聚糖饼干工艺及品质评价[J]. 粮食与饲料工业, 2022, **5**: 36-43 [Jang D, Chen Y, Song TN, Yuan YH, Chen ZY, Sun DH. Optimize the process and quality analysis of high-content highland barley β -glucan cookie by response surface methodology [J]. *Cereal Feed Ind*, 2022, **5**: 36-43]
- 175 游茂兰, 邓婧, 覃小丽, 金剑波, 叶正荣, 易川虎, 刘雄. β -葡聚糖对传统青稞酒发酵的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, **45** (10): 149-154 [You ML, Deng J, Qin X, Jin J, Ye ZR, Yi CH, Liu X. Effect of β -glucan on the traditional highland barley wine fermentation [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, **45** (10): 149-154]
- 176 陈茂彬, 钟晓凌. β -葡聚糖对大麦加工的影响和 β -葡聚糖酶的应用[J]. 食品研究与开发, 1999 (3): 25-27 [Chen MB, Zhong XL. Effect of β -glucan on barley processing and application of β -glucanase [J]. *Food Res Dev*, 1999 (3): 25-27]