

发芽燕麦淀粉的分子结构与体外消化性

田斌强^{1,2}, 邓乾春³, 谢笔钧²

(1. 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450002) (2. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070)

(3. 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北武汉 430062)

摘要: 对晋燕八号燕麦避光发芽, 并分别提取不同时间段的淀粉, 用凝胶渗透色谱, 特征黏度法和高效离子交换色谱对提取样品分别进行了分子量分布、特征黏度和链长分布的表征。结果发现, 发芽过程中燕麦直链淀粉的含量升高, 特征粘度增大, 二者存在有显著的正相关关系; 聚合度在 27~33 的链段始终是燕麦淀粉结构中的主体, 所占比例超过 60%, 发芽过程中聚合度小于 31 的链段比例不断减小, 而大于 33 的链段随发芽进行比例不断升高, 这预示着, 发芽期间生物自身对淀粉的利用以短链为主。对发芽过程中提取的淀粉与未发芽燕麦淀粉进行了体外消化性比较实验, 结果表明, 发芽过程降低了燕麦中淀粉的水解指数和血糖指数。燕麦淀粉中间级分对于体外消化指数影响明显, 显著正相关系数 0.82。

关键词: 燕麦; 发芽; 淀粉; 分子结构; 体外消化

文章编号: 1673-9078(2014)6-87-91

Molecular Structure and *in vitro* Digestibility of Germinated Oat Starch

TIAN Bin-qiang^{1,2}, DENG Qian-chun³, XIE Bi-jun²

(1. College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2. College of Food Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(3. Oil Crops research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

Abstract: The Jinyan VIII oat was germinated in the dark, and then starches were extracted from different germination periods. The intrinsic viscosity, molecular weight and chain length distribution of samples were characterized by Ubbelohde viscometer, gel permeation chromatography and ion exchange chromatography, respectively. It was found that the amylose content and intrinsic viscosity of germinated oat starches increased compared to raw oat starches, and a significant positive correlation presented between them. The degree of polymerization (DP) in segments 27~33 dominated raw and malted oat starches, occupying more than 60%. The segments with DP≤31 decreased continually, while the segments with DP≥33 increased, indicating that energy conversion during germination depended on utilizing short-chain starch. The *in vitro* digestibility of raw and germinated oat starches showed that the germination process reduced the hydrolysis index and the glycemic index of oat starch, and intermediate fractions of oat starch played obviously impact on *in vitro* digestion index, with a significant positive correlation coefficient of 0.82.

Key words: oat; germination; starch; molecular structure; *in vitro* digestibility

人们很早就利用发芽过程生产豆芽、麦芽等食物。植物生理学上, 植物种子发芽完成的可视信号通常是胚根刺穿胚芽周围组织^[1], 通俗地说, 只要看见胚芽露白即是发芽完成。食品研究领域往往会适当延长发芽的时间, 使得其中的营养物质发生较为充分的变化, 外观上表现为种子的芽和根具有一定的长度, 即食品研究领域发芽的概念对应于植物生理学中种子发芽和幼苗生长初期。这个过程实际涉及到生命体内复杂的变化过程, 包含水分吸收、信号传递、酶的启动等等,

收稿日期: 2014-01-03

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2006BAD27B09)

作者简介: 田斌强 (1976-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为天然产物化学

通讯作者: 谢笔钧 (1943-), 女, 教授, 研究方向为天然产物化学

最终导致贮藏物质的消耗利用和新物质及组织生成。近年来, 围绕谷物和豆类发芽的研究也越来越多。在 CNKI 数据库中搜索发现, 2000 年以前, 食品领域文章中含有“发芽”一词的文献仅有 10 篇左右, 而现在可以达到 70 余篇。

人们已经认识到燕麦中含有丰富蛋白质 (尽管有争议, 但有相当一部分研究认为燕麦蛋白属低过敏性) 和优质油脂, 单不饱和和脂肪酸含量高, 还发现燕麦中含有 1.8%~7.9% 的 β -葡聚糖^[2], 葱酰胺几乎是燕麦中特有的有益于治疗动脉硬化的多酚^[3]。可以说, 燕麦是营养丰富、保健功能多样的小杂粮, 已经吸引了越来越多研究人员的注意。目前已有一些含有燕麦成分的深加工产品出现在市场。对燕麦进行发芽处理是可进一

步提升燕麦价值,近年来,国内已有一些研究出现。

淀粉是大部分谷物和豆类种子的主要贮藏物质,发芽对谷物中淀粉会产生什么影响是人们普遍关心的问题之一,这方面已有研究包括发芽对淀粉颗粒外观、溶解度、冻融稳定性、直链淀粉和支链淀粉比例、糊化性质和流变性质等方面的影响。

徐建国等对燕麦发芽过程中淀粉理化特性和相关酶活性的动态变化进行了研究^[4-5],其部分结果与我们先前的研究近似^[6]。要对发芽过程中淀粉的理化特性变化做出合理解释,一定程度上还有赖于对淀粉分子结构进行研究。本文采用凝胶渗透色谱,特征黏度法和高效离子交换色谱研究了发芽前后燕麦淀粉分子结构的变化,并评价了淀粉的体外消化性。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

实验所用裸燕麦品种为晋燕八号,由山西省农科院高寒植物研究所李刚老师提供。糖苷酶(A3042), α -淀粉酶(A3176),异淀粉酶(15284)均购自Sigma公司;Sephrose CL-2B 色谱柱材料购自Pharmacia公司,其他试剂为分析纯。

1.2 主要仪器设备

0.6 mm 乌氏黏度计,浙江椒江市玻璃仪器厂;XK26 色谱柱,Pharmacia 公司;LC-6A 恒流泵,日本Shimadzu;BSZ-160 自动部份收集器,上海沪西分析仪器厂;Dioex-DX2500 高效离子交换色谱,美国戴安公司。

1.3 实验方法

1.3.1 燕麦发芽与淀粉提取

燕麦发芽方法参见^[6]。未发芽燕麦淀粉提取流程为:燕麦粉碎过筛,石油醚脱脂,反复用 0.01 M NaOH 脱蛋白,滤渣后离心,弃上清和沉淀上层的深色物质,得到的湿淀粉用 HCL 溶液调节 pH 至中性,用清水洗涤 3 次并离心,沉淀物在 40 °C 鼓风干燥箱中干燥过夜。干燥后的淀粉研磨成细粉,过 160 目筛待用。发芽燕麦淀粉的提取办法与未发芽燕麦淀粉提取办法所不同的是,将发芽过程中的燕麦鲜样直接加 NaOH 溶液在粉碎机中粉碎,再进行其他后续提取过程。

1.3.2 淀粉的相对分子质量分布^[7]

150 mg 淀粉溶于 10 mL 90% (V/V) 的二甲亚砜(DMSO)溶液,从中取出 1 mL 加入无水甲醇以沉淀淀粉,然后 5000 g 离心 20 min,沉淀复溶于 5 mL 沸水

中,并搅拌 20 min,然后 5000 g 离心 30 min,弃沉淀,上清液注入 Sepharose CL-2B 色谱柱(XK26, Pharmacia, 2.6 cm i.d.×90 cm)。洗脱液为 50 mmol/L 的 NaCl (含 0.02% 叠氮钠),洗脱速率 0.3 mL/min,每管收集 3 mL,共收集 80 管。用硫酸苯酚法在 490 nm 处测定各管反应物吸光度,并据此绘制洗脱曲线,Origin 8.0 软件进行积分计算。

1.3.3 燕麦淀粉的特征黏度测定^[8]

以 DMSO 为溶剂配制浓度为 0.1%~0.4% (m/V) 的淀粉溶液,用乌氏黏度计在 25 °C 下测定不同浓度样品的流出时间 t 以及 DMSO 的流出时间 t_0 ,然后计算增比黏度(η_{sp})、相对粘度(η_r),以 c 为横坐标, η_{sp}/c 和 $\ln\eta_r/c$ 为纵坐标作图,得两条曲线,再用二次多项式回归后,计算两曲线上截距的平均值作为特征黏度 $[\eta]$ 。

1.3.4 淀粉的链长分布^[9]

10 mg 淀粉分散于 2 mL 90% 的 DMSO 溶液置沸水浴 20 min,冷却后加入 6 mL 甲醇混匀,冰浴 30 min。然后 1000 g 离心 10 min,再将沉淀用 50 mM pH 3.5 醋酸钠缓冲液 2 mL 溶解,沸水浴处理 20 min,37 °C 平衡后加入 5 μ L 异淀粉酶脱支,样品 37 °C 反应 24 h,然后沸水浴 10 min 将酶灭活。取冷却后的脱支样品 200 μ L 用 2 mL 150 mM 的 NaOH 溶液稀释,再用 0.45 μ m 滤膜过滤,随后注入 HPAEC-PAD 系统(50 μ L 样品环)进行分析。流动相由 He 离子喷溅的蒸馏去离子水配制,流动相 A: 100 mM NaOH,流动相 B: 100 mM NaOH 于 500 mM NaAc。线性因子由 Dionex CarboPacTM PA100 柱采用梯度洗脱(0~5 min, 40% A; 5~15 min, 70% A; 15~50 min, 70% A+30% B)柱温 35 °C,流速 0.8 mL/min。分析柱前加 CarboPacTM PA100 保护柱。

1.3.5 燕麦淀粉的体外消化动力学^[10]

100 mg 样品加入 30 mL Tris-Maleate (pH 6.9)缓冲液和 10 mL 用该缓冲液配成的含有 2.6 U 的 α -淀粉酶,在 37 °C 水浴摇床中孵育 0~3 h,每隔一定时间取出 1 mL 反应混合物置沸水浴灭酶活 5 min,随后冷却至室温,加入经 0.4 M 醋酸钠缓冲液(pH 4.75) 100 倍稀释的葡萄糖苷酶 3 mL,在 60 °C 水浴摇床中反应 45 min,用 DNS 法测定葡萄糖含量,葡萄糖含量乘以 0.9 记为淀粉含量。用方程 $C=C_{\infty}(1-e^{-kt})$ 拟合淀粉体外水解曲线,得到动力学参数反应平衡时浓度 C_{∞} 和反应动力学常数 k。按下述公式计算水解曲线下面积(Area under curve, AUC):

$$AUC=C_{\infty}(t_f-t_0)-(C_{\infty}/k)[1-\exp[-k(t_f-t_0)]]$$

注: t_f 为最终的时间(180 min)、 t_0 为反映初始时间(0 min),k 为反应动力学常数。

再根据 Goni 的方法^[10]计算体外水解指数 HI,然

后以方程 $EGI=39.71+0.549 \times HI$ 计算血糖指数 EGI。

1.3.6 数据分析

描述性统计用 Origin 8.0 软件完成, 相关性分析用 SPSS16.0 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 发芽对燕麦淀粉组成的影响

表 1 凝胶渗透色谱测定燕麦淀粉中支链淀粉和直链淀粉含量

Table 1 The content of amylopectin and amylose in oat starches

measured by SEC			
样品	支链淀粉 比例/%	中间级分 比例/%	直链淀粉 比例/%
未发芽燕麦淀粉	55.87±1.48	30.69±0.81	13.44±0.36
浸泡燕麦淀粉	36.71±0.60	25.47±0.42	37.82±0.62
24 h	56.26±1.72	24.48±0.75	19.26±0.59
48 h	59.92±2.06	19.63±0.68	20.45±0.70
72 h	64.01±2.68	17.64±0.74	18.35±0.77
96 h	63.04±1.87	18.01±0.54	18.95±0.57
120 h	57.11±2.04	20.80±0.74	22.09±0.79
144 h	54.84±1.33	19.22±0.47	25.94±0.63

用 Origin 8.0 软件对各样品凝胶渗透色谱洗脱曲线进行积分, 并计算得到燕麦发芽前后支链淀粉和直链淀粉的变化情况如表 1。从中可以看出经过发芽以后, 燕麦中直链淀粉的含量明显增加, 比未发芽燕麦增加 36.53% 以上, 浸泡样品增加量超过 180%, 中间级分有所减少, 除浸泡样品的支链淀粉含量明显变小外, 别的发芽以后样品的支链淀粉含量与原样品相比变化不大。原燕麦淀粉中直链淀粉含量仅为 13.44%, 浸泡后直链淀粉为 37.82%, 它是所有样品中直链淀粉含量最高的一个, 发芽后直链淀粉最高的是 144 h 的样品, 直链淀粉含量为 25.94%。除原燕麦淀粉中直链淀粉低于已有报道和浸泡样品显著高于已有报道外, 别的样品中直链淀粉含量均处于已有报道的 18% 到 29% 之间^[11~12], 中间级分淀粉比支链淀粉包含的链更长, 但是高支化度的分子要少^[13]。所以, 在自然水解过程中, 中间级分的水解使支化度进一步降低并以直链淀粉的形式出现可能是导致发芽过程中直链淀粉含量增加的原因。至于浸泡阶段相对于原淀粉来讲, 支链淀粉的突然减少和直链淀粉的显著增加的原因尚不清楚, 有待进一步研究。

2.2 发芽对于燕麦淀粉特征黏度的影响

不同发芽时间燕麦中淀粉的特征黏度变化如图 1 所示。从中可以看出, 发芽 144 h 样品的特征黏度最高

达到 196.1 g/g, 浸泡后的样品次之, 为 191.0 g/g, 原燕麦的特征黏度最小为 130.8 g/g, 发芽 24 h 开始淀粉的特征黏度基本是处于整体增大趋势。特性黏度 $[\eta]$ 的大小受相对分子质量、分子形状、溶剂特性和温度等因素的影响。本研究中溶剂和温度保持不变, 所以特征黏度的差异只是由于相对分子质量和分子形状的差异。相对分子质量越大, 则特征黏度越大, 在我们研究的发芽时间段内, 淀粉的分子量可能比原燕麦淀粉的相对分子质量大。

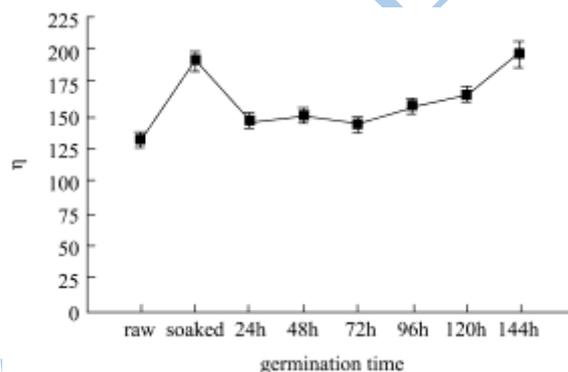


图 1 不同发芽时间的燕麦淀粉特征黏度

Fig.1 Intrinsic viscosity of starches from oat germinated for different time.

2.3 发芽对淀粉链长分布的影响

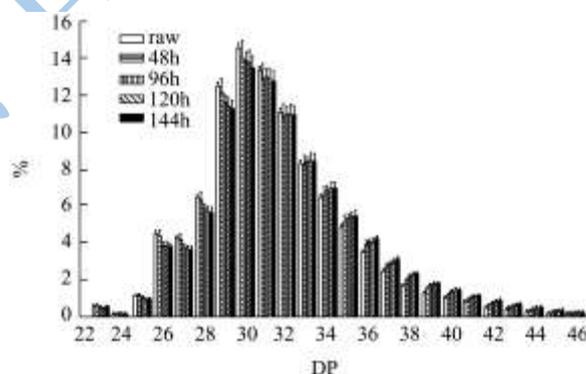


图 2 发芽对于燕麦中淀粉链长分布的影响

Fig.2 Effects of germination on chain length distribution of oat starches

燕麦淀粉经异淀粉酶酶解后, 其链段分布如图 2 所示, 从图 2 可以看出, 在离子交换色谱图上的最小链段的聚合度 (DP) 为 23, 随发芽进行 DP \leq 31 的链段比例不断减小, DP=32 的链段比例基本不变化, 而 DP \geq 33 的链段随发芽进行比例不断升高。发芽前后长度在 27<DP \leq 33 范围内的链段主体地位没有发生改变, 所占总比例始终保持在 60% 以上, 长度在超过 39 范围内的链段比例不断升高, 但所占比例不超过 5%。从表 2 中可以看出, DP2 与直链淀粉含量有极显著负相关性, 而 DP3 和 DP4 则与其有显著正相关性。对于这些结果的解释可

以有这样的假设：一是在发芽期间生物自身的水解先选择较短链，而长链不发生变化，这样随着发芽进行，短链的消耗，长链比例升高，短链比例下降；二是两者都发生降解，但是短链的降解速度更快造成短链比例下降，长链比例上升。这里长短链的划分界限是DP=32，大于该值即为长链，小于该值则为短链。无论出现哪一种假设，我们都至少可以肯定，144 h发芽期间生物自身利用以短链为主。

表 2 淀粉链长分布与淀粉组成的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between distribution of chain

length and composition of starch							
	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	Ap	Mw
DP2	0.93*						
DP3	-0.85	-0.90*					
DP4	-0.99**	-0.96**	0.91*				
DP5	-0.29	-0.60	0.35	0.38			
Ap	0.07	0.01	-0.30	-0.15	0.24		
Mw	0.68	0.84	-0.63	-0.69	-0.74	-0.52	
Am	-0.82	-0.96**	0.93*	0.90*	0.65	-0.84**	-0.02

注：DP1 表示 DP≤27；DP2 表示 27<DP≤33；DP3 表示 33<DP≤39；DP4 表示 39<DP≤46；DP5 表示 DP>45。

2.4 发芽前后淀粉消化率以及血糖指数的变化

实验中，在燕麦淀粉酶解初期 90 min 水解速率上升较快，超过 120 min 时，水解基本达到平衡状态。与汪兰^[4]的结果相比，燕麦淀粉在燕麦发芽前后的体外水解时达到平衡浓度的时间晚于大米淀粉，表现为缓慢释放过程，说明燕麦淀粉对酶的抗性较好^[5]，经发芽以后的燕麦中淀粉的最终水解率均小于经过浸泡或发芽的燕麦中的淀粉。按照动力学方程 $C=C_{\infty}(1-e^{-k})$ 进行拟合得到动力学参数见表 3。从中可以看出，未发芽燕麦的淀粉水解时得到最高的水解平衡浓度，水解指数超过 100，表明未经处理的燕麦淀粉消化性很好。动力学常数以发芽 24 h 和 48 h 样品最大，说明二者达到平衡浓度的速度最快。发芽后其消化性有所降低，其中以发芽 24 h 为最小，该样品较未经处理的燕麦淀粉平衡浓度下降了近 20%，随着发芽继续，燕麦中淀粉的体外消化平衡浓度又有所增加。这可能是在发芽过程中，淀粉中最容易被水解的部分最先被利用，到一定程度后，酶解变得困难，随着发芽时间延长，颗粒变得疏松，酶解再一次变得较为容易。未发芽燕麦的水解指数和血糖指数分别为 102.21 和 95.83，发芽过程中这两个数值最小的样品为发芽 24 h 的样品，其水解

指数为 85.08，对应血糖指数为 86.42。比较而言，发芽过程降低了燕麦中淀粉的水解指数和血糖指数。

表 3 燕麦淀粉体外消化时的平衡浓度 (C_{∞})，动力学常数 (K)，水解指数 (HI) 以及预测血糖指数 (GI)

Table 3 Equilibrium concentration (C_{∞}), kinetic constant (K), hydrolysis index (HI) of oat starches digested in vitro, and estimated glycemic index (EGI)

样品	C_{∞}	K	HI	EGI
Raw	81.17±6.73	0.04±0.00	102.21±8.47	95.83±7.95
Soaked	67.74±4.39	0.05±0.00	89.45±5.80	88.82±5.76
24 h	63.22±5.17	0.06±0.00	85.08±6.96	86.42±7.07
48 h	64.81±3.48	0.06±0.00	87.19±4.68	87.57±4.71
72 h	65.51±4.12	0.04±0.00	85.07±5.35	86.41±5.43
96 h	69.67±4.45	0.03±0.00	85.96±5.49	86.90±5.55
120 h	70.55±5.16	0.04±0.00	88.66±6.48	88.38±6.46
144 h	70.17±4.47	0.03±0.00	87.41±5.57	87.70±5.59

2.5 体外消化与特征黏度以及淀粉组成之间的相关性

表 4 燕麦淀粉体外消化动力学参数、特征黏度及分子量分布之间相关性分析

Table 4 Correlation analysis between amylopectin (Ap) and amylose (Am) content, intrinsic viscosity ($[\eta]$), and kinetic parameter of digestion in vitro for oat starches

	Ap	Mw	Am	$[\eta]$	C_{∞}	K	HI
Mw	-0.52						
Am	-0.84**	-0.02					
$[\eta]$	-0.60	-0.24	0.86**				
C_{∞}	-0.06	0.60	-0.31	-0.18			
K	-0.22	0.26	0.09	-0.27	-0.50		
HI	-0.21	0.82**	-0.27	-0.31	0.91**	-0.13	
GI	-0.21	0.82**	-0.27	-0.31	0.91**	-0.13	1

注：2-tailed test, **P<0.01, *P<0.1, Mw (medium molecular weight, 中间级分)。

直链淀粉分子通常不像支链淀粉分子那样卷得较紧成一个线团，而是更接近链状，在稀溶液状态下，既可以表现出溶剂分子的摩擦力，还可以更多表现淀粉分子间的相互作用。黏度是分子运动时内摩擦力的量度，直链淀粉含量越高，则淀粉分子间的相互作用越大，黏度就越高。从表4中可以看出，直链淀粉含量和特征黏度有显著的正相关关系，相关系数0.86 (P<0.01)。这与燕麦发芽时淀粉非常有限的降解、直链淀粉分子量有限减小，支链淀粉侧链有显著降解的研究报道相一致^[6]。而且从链长分布的变化来看，长

链比例升高对于黏度的增大也有一定贡献。

燕麦淀粉中间级分对于体外消化指数影响明显,二者呈显著正相关,相关系数0.82 ($P<0.01$)。通常认为,直链淀粉与淀粉消化性之间有密切关系,但汪兰^[14]对11个品种大米淀粉体外消化的研究表明,直链淀粉并不是影响淀粉消化性的唯一因素。

3 结论

3.1 用凝胶渗透色谱分析了燕麦淀粉中直链淀粉和支链淀粉含量,浸泡后燕麦中的淀粉直链淀粉含量达到37.6%,发芽阶段直链淀粉含量逐渐增大到25.8%,而未发芽燕麦的淀粉中直链淀粉含量仅为13.3%。特征粘度以浸泡后样品和发芽144 h样品为最高,分别为191 g/g和196.1 g/g,比未发芽燕麦中淀粉的特征黏度130.8 g/g高出很多。直链淀粉含量与特征粘度呈显著正相关,相关系数0.86 ($P<0.01$)。

3.2 体外消化实验结果表明,未发芽燕麦的淀粉具有最高的水解平衡浓度,水解指数为102.21,发芽以后燕麦中淀粉的水解指数和预测血糖指数有所降低。淀粉中的中间级分含量与水解指数有显著相关性,相关系数0.82 ($P<0.01$)。

3.3 淀粉在发芽过程中降解以DP=32为界,短链段比例降低,长链段比例升高,预示着生物利用以较短链为主。主要发生在DP介于33和45的部分,同时使支化度较小的部分减小,逐渐降解为单糖和小分子寡糖。

参考文献

- [1] Bewley J D. Seed germination and dormancy [J]. The Plant Cell, 1997, 9: 1055-1066
- [2] Saastamoinen M, Hietaniemi V, Pihlava J-M, et al. β -glucan contents of groats of different oat cultivars in official variety, in organic cultivation, and in nitrogen fertilization trials in Finland [J]. Agricultural and Food Science, 2004, 13: 68-79
- [3] Lin Nie, Mitchell L Wise, David M Peterson, et al. Avenanthramide, a polyphenol from oats, inhibits vascular smooth muscle cell proliferation and enhances nitric oxide production [J]. Atherosclerosis, 2006, 186: 260-266
- [4] 徐建国,郝艳芳,闫华娟,等.燕麦发芽过程中淀粉及其相关酶活性的动态变化[J].中国粮油学报,2012,27(4):25-28
XU Jian-guo, HAO Yan-fang, YAN Hua-juan, et al. Dynamic changes in starch and relevant enzyme activity in oat groats during germination [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(4): 25-28
- [5] 徐建国.燕麦发芽过程中淀粉理化特性的变化[J].中国粮油学报,2012,27(5):27-31
XU Jian-guo. Changes in the physicochemical properties of starch in oats (*Avena nuda* L.) during germination [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(5): 27-31
- [6] Binqiang Tian, Bijun Xie, John Shi, et al. Physicochemical changes of oat seeds during germination [J]. Food Chemistry, 2010, 119: 1195-1200
- [7] Ying-Pi Lin. Physicochemical properties of corn flour and starch and their relation to gel texture of two dry-milled fractions [D]. Purdue University, USA, 1997
- [8] 许永亮,程科,赵思明,等.大米淀粉的分子量分布及其与粘性的相关性研究[J].中国农业科学,2007,40(3):566-572
XU Yong-liang, CHENG Ke, ZHAO Si-ming, et al. Molecular weight distribution of rice starches and its correlation with viscosity [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(3): 566-572
- [9] Jayakody L, Hoover R, Liu Q, et al. Studies on tuber and root starches I. Structure and physicochemical properties of inuala (*Solenostemon rotundifolius*) starches grown in Sri Lanka [J]. Food Research International, 2005, 38: 615-629
- [10] Goñi Isabel, Garcia-Alonso Alejandra, Saura-Calixto Fulgencio. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437
- [11] Doublier J L, Patom D, Liams G. A reological investigation of oat starch pastes [J]. Cereal Chemistry, 1987, 64: 21-26
- [12] Gudmundsson M, Eliasson A C. Some physicochemical properties of oat starches extracted from varieties with different oil content [J]. Acta Agriculture Scand, 1989, 39: 101-111
- [13] Wang L Z, White P J. Structure and properties of amylose, amylopectin, and intermediate materials of oat starches [J]. Cereal Chemistry, 1994, 71: 263-268
- [14] 汪兰.大米淀粉宏观性能、消化性及与水分子运动性的关系[D].武汉:华中农业大学,2008
WANG Lan. Relationship between macroscopic properties, digestion of rice starch and water molecular mobility [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008
- [15] Granfeldt Y, Bjorck I, Eliasson A C. An examination of the possibility of lowering the glycemic index of oat and barley flakes by minimal processing [J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130: 2207-2214
- [16] Manners D J, Bathgate G H. α -1, 4-Glucans. Part XX. The molecular structure of the starches from oats and malted oats [J]. Journal of the Institute of Brewing, 1969, 75: 169-175

现代食品科技