

文章编号: 1000-0615(2019)10-2102-07

DOI: 10.11964/jfc.20190911975

· 综述 ·

不同淀粉源对水产膨化饲料加工及品质特性影响研究进展

杨洁¹, 李军国^{1,2}, 许传祥¹, 王昊¹, 马世峰¹, 薛敏^{1*}

(1. 中国农业科学院饲料研究所, 饲料加工创新团队, 北京 100081;

2. 农业农村部饲料生物技术重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 淀粉在水产膨化饲料加工过程中起着非常重要的作用, 不仅能增强物料的粘性, 在膨化饲料中起到膨胀和粘合的双重作用。由于不同来源淀粉的颗粒结构不同, 其对水产膨化饲料加工和品质等产生的影响也存在差异。本研究综述了不同淀粉源的基本特性与水产膨化饲料加工及品质特性之间关系的研究进展, 分析不同淀粉源淀粉的组成、结构、糊化特性、流变特性和热力学特性等方面的差异, 比较不同淀粉源对水产膨化饲料品质特性的影响, 并对不同淀粉源在研究过程中存在的问题、发展方向进行展望。

关键词: 不同淀粉源; 组成结构; 加工特性; 膨化饲料; 研究进展

中图分类号: S 963

文献标志码: A

水产膨化饲料是一种低污染、高效率、高转化率的优质环保型饲料。目前, 欧洲许多国家和地区已经形成以膨化饲料为主流的加工与养殖新模式^[1-3]。淀粉在水产膨化饲料加工过程中起着非常重要的作用, 不仅能增强物料的粘性, 在膨化饲料中起到膨胀和粘合双重作用, 而且可以使膨化饲料形成一定的硬度并增加饲料在水中的稳定性^[4-5]。相关研究发现来源不同的淀粉其加工特性也不同, 例如小麦、玉米和大米中的淀粉具有很好的膨化效果, 块茎淀粉不仅具有较好的膨化性能, 而且具有很好的粘结能力^[6]。张立彦等^[7]比较5种淀粉源的膨化效果, 发现糯米粉产品膨化率最大, 其次依次为马铃薯淀粉、木薯淀粉、玉米淀粉、小麦淀粉, 马铃薯淀粉及糯米粉物料膨化产品的组织状态较佳, 孔隙均匀、孔径较大, 孔壁呈极薄的透明玻璃状, 糯米粉物料产品更优于马铃薯淀粉, 而玉米及小麦淀粉的膨化产品组织状态最差, 谷物淀粉膨化产品的硬度比块根淀粉的产品硬度稍大, 说明淀粉的加工特性直接影响

水产膨化饲料的成型特性。本研究对国内外不同淀粉的组成结构、性质及其加工特性研究现状进行系统分析和归纳总结, 以期为我国不同淀粉源的研究及其在水产膨化饲料中的加工利用提供参考依据。

1 淀粉组成对水产膨化饲料加工及品质特性的影响

淀粉主要由直链淀粉和支链淀粉构成, 二者的分子聚集状态与分子结构不同。大部分淀粉含有更多的支链淀粉, 例如玉米淀粉含27%直链淀粉; 马铃薯淀粉含20%直链淀粉; 糯米淀粉几乎全部是支链淀粉; 部分豆类的淀粉则全是直链淀粉。支链淀粉具备增稠作用、高收缩性、水吸收性和抗老化特性等, 而直链淀粉具备优良的质构调整特性和凝胶性等^[8-10]。相关研究表明, 淀粉中直链淀粉的含量和支链淀粉与直链淀粉的比例会对水产膨化饲料的加工产生重要影响^[11-13]。Chinnaswamy等^[14]比较了不同直链

收稿日期: 2019-09-19 修回日期: 2019-09-25

资助项目: 北京市自然科学基金(6194043); 中国农业科学院基本科研业务费(1610382019002, 1610382017015); 中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2017-FRI-08); 国家重点研发计划(2016YFF0201800, 2018YFD0900400); 北京市鲟鱼鳊鱼产业技术体系(BAIC08-2019)

通信作者: 薛敏, E-mail: xuemin@caas.cn

淀粉含量的玉米淀粉挤压膨化产品的截面膨化率,结果显示随着直链淀粉含量的增大,膨化产品的膨化度呈现先增大后减小的趋势。Della等^[15]研究了直链淀粉质量分数为23.5%、47.0%、70.0%的玉米淀粉膨化产品的膨化度,结果表明随着直链淀粉含量的增加,膨化产品的膨化度增大。汤坚等^[16]研究发现,玉米淀粉在挤压过程中,直链部分没有发生显著变化,淀粉降解主要发生在淀粉的支链部分,支链淀粉可以促进膨化。刘林三等^[17]研究发现,与普通玉米相比,高直链玉米的膨化产品表面相对平滑,内部气室较小且密集,膨化度较低。直链淀粉含量高的淀粉,挤压膨化产品的质地较硬,膨化度较小;支链淀粉含量高的原料,挤压膨化产品的膨化效果较好,这是因为支链淀粉是一种呈分支状的分子,分子间的键在高温作用下很容易断裂,当支链淀粉分子质量较大时,其链状分支构造在糊化后可以形成复杂的网状结构,网目结构强而不易崩塌,物料在膨化过程中能承受较强的蒸气压力且结构不易被破坏,使得样品容易膨化,并且膨化度较大。以上研究表明,支链淀粉在水产膨化饲料生产过程中起着膨胀作用。

2 淀粉结构对水产膨化饲料加工及品质特性的影响

不同来源的淀粉颗粒大小、形态和结构等品质特性也各不相同^[18-19]。淀粉粒具有各自不同的形状,如小麦和玉米淀粉粒为圆形,马铃薯和木薯淀粉粒为卵形,大米和燕麦淀粉粒为多角形,其中马铃薯淀粉粒最大,大米淀粉粒最小。同一种来源的淀粉粒因受生长条件和成熟度等的影响,形状也存在差异。淀粉颗粒是多晶体系,淀粉的颗粒结构包含晶体层和非晶体层2部分,晶体层主要由支链淀粉分子以双螺旋结构形成,结构较为致密,不易受外力和化学试剂作用;非晶体层主要由直链淀粉分子以松散结构形成,易受外力和化学试剂作用^[20]。因此,不同来源淀粉对水产饲料膨化加工处理的反应也必然存在差异。Baldwin等^[21-23]人利用激光扫描共聚焦显微镜观察到淀粉颗粒中的内部通道,发现直链淀粉含量不同的淀粉,其通道结构有显著差异。糯玉米(低直链淀粉)中的通道比

普通玉米淀粉(高直链淀粉)中的通道多,且这些通道更分散^[24]。Jiang等^[25]研究发现多数谷物类,如玉米、高粱、大麦、小麦等淀粉颗粒表面有孔结构,孔结构在淀粉表面的分布是随机的。Chen等^[24]研究发现淀粉颗粒内部有通道结构,通道与表面的孔连接。Zhang等^[26]研究发现孔、通道和空洞结构的存在对淀粉颗粒的降解起着重要作用,空洞多的淀粉颗粒容易吸水膨胀。以上研究表明,在水产膨化饲料加工过程中孔洞多的淀粉原料更容易发生化学反应。

3 淀粉糊化特性对水产膨化饲料加工及品质特性的影响

在水产膨化饲料的加工中淀粉起非常重要的粘合剂作用,主要针对淀粉的糊化过程^[4]。淀粉的糊化特性主要是通过淀粉糊的粘度性质、流变学性质和热力学性质等几个方面反映。

淀粉的糊化特性包括,糊化温度、峰值粘度、最终粘度、回生值等五个参数。糊化温度指淀粉糊化所需要的最低温度,此温度反映能量的消耗。峰值粘度反映淀粉结合水的能力,它与最终产品的质量有关,可作为一个指标来说明膨化机的粘性负载。最终粘度反映淀粉在熟化并冷却后形成粘糊或凝胶的能力。回生值与各种产品的质地密切相关,回生值高,可能与凝胶脱水或液体的渗析有关。淀粉的种类和颗粒大小是影响其糊化的重要因素,Ratnayake等^[27]研究指出糊化温度与淀粉源有关,木薯淀粉的糊化温度为49~65℃,小麦的糊化温度为58~64℃,高粱的糊化温度为71~80℃。相关研究指出,颗粒形状为卵形和圆形的淀粉比多角形的淀粉容易糊化,直链淀粉含量低的比直链淀粉含量高的淀粉容易糊化^[28]。小颗粒淀粉内部结构紧密,糊化温度比大颗粒高;直链淀粉分子间结合力较强,因此直链淀粉含量高的淀粉比直链淀粉含量低的淀粉难糊化。并且,不同淀粉源会影响淀粉糊化后的粘度,这也是决定水产膨化饲料品质的关键因素^[29-30]。艾志录等^[31]研究了小麦、玉米、马铃薯、木薯、绿豆5种淀粉原料,结果表明马铃薯淀粉的峰值黏度最大,玉米淀粉的峰值黏度最小,这说明马铃薯淀粉颗粒在糊化过程中有较大膨化程度,玉米淀粉膨化程度较小;小麦和玉米淀粉的衰减值较小,

这表明小麦和玉米淀粉热糊的稳定性好,而马铃薯淀粉和木薯淀粉热糊稳定性差。付一帆和贾玉涛等^[32-34]研究指出不同种类的淀粉糊化温度不同,溶液粘度的变化值也不同,且在同一糊化温度下,不同种类淀粉溶液的粘度值也各不相同。

同时,淀粉的流变学特性也会影响其膨化加工特性,流变特性可以分为动态流变特性和静态流变特性。动态流变特性是指在振动或搅拌应力的作用下淀粉糊呈现的粘弹性行为。表征参数有弹性模量(G')、粘性模量(G''),弹性模量越大,淀粉糊的恢复能力越强,弹性越强;粘性模量越大,淀粉糊抵抗流动的能力越强,淀粉糊的粘性越大^[35-37]。王磊等^[38]研究了玉米淀粉糊的流变特性,发现在同一剪切速率下,粘度随着质量浓度增大而增大,同时淀粉糊发生剪切变稠现象,可能是由于受到外力作用时,淀粉分子原来的结构被破坏,形成新的结构而导致的体积“膨胀”。刘晓媛等^[39]研究了湿热处理对甘薯淀粉流变特性的影响,发现相对于原淀粉,湿热改性甘薯淀粉糊的黏弹性明显增加。张立彦等^[7]研究了小麦淀粉、玉米淀粉、糯米淀粉、马铃薯淀粉和木薯淀粉的流变特性,发现各类淀粉的流变特性有很大差异,其中,糯米淀粉和马铃薯淀粉80℃时的膨润度和淀粉糊粘度比其他3种淀粉要大很多,而淀粉的膨化与淀粉颗粒膨润度和淀粉糊化粘度有密切的关系,粘度大的淀粉膨化的倍数大,膨润度高的淀粉膨化倍数也大。小麦淀粉和玉米淀粉的膨润状态差,淀粉粒间的相互粘着性差,粘度较小,在膨化过程中不易形成气泡的包裹体,因而影响淀粉的膨化。

按热力学分析,淀粉糊化过程是淀粉微晶的熔融过程,淀粉颗粒发生了从有序到无序的相转变,包括淀粉颗粒的吸水吸热、溶胀水化、结晶态消失及糊粘度急剧增加等复杂现象。在水产膨化饲料加工过程中高温和高剪切力使物料转变为有粘弹性的熔融体,熔融体的粘弹性受物料本身特性的影响。物料不同,熔融体的玻璃化转变温度不同,气泡收缩时间不一样,膨化产品的膨化度不同^[40]。同时,颗粒中气孔的数量和大小与容重有关,气孔的数量越多,颗粒的容重越低。孔隙的大小取决于颗粒在模孔处的膨胀情况^[41]。

因此,在水产膨化饲料加工过程中,要考虑不同淀粉源的糊化特性、流变特性和热力学特性的差异,选择合适的淀粉源。

4 不同淀粉源对水产膨化饲料品质的影响

配方中淀粉的含量和类型会对水产膨化饲料的品质产生影响^[42]。相同的淀粉含量,淀粉源不同,膨化效果也会产生差异,通常来说膨化效果:糯米淀粉>薯类淀粉>玉米淀粉>小麦粉^[43-44]。袁军等^[45]研究了玉米、面粉、木薯淀粉对膨化饲料颗粒质量的影响,发现木薯淀粉组膨化颗粒饲料的膨化度显著高于玉米和面粉组,容重和硬度低于玉米和面粉组,但水中稳定性差异不显著。Ah-Hen等^[46]研究发现配方中不同淀粉源及淀粉含量会对膨化特性产生影响,木薯淀粉的使用会增大颗粒的直径,基于Alvarezmartinez等^[47]的研究,木薯淀粉中的支链淀粉含量较高可以解释木薯淀粉的膨化率最高。Glencross等^[48]研究不同淀粉源对鲈鱼膨化饲料颗粒质量的影响以及Kannadhasan等^[49]研究玉米淀粉、木薯淀粉和马铃薯淀粉对膨化饲料颗粒质量的影响也得到了相同的结果。张嘉琦等^[50]研究了高粱、膨化高粱、面粉作为淀粉源对水产膨化饲料品质的影响,发现面粉为淀粉源的水产膨化饲料品质最好,膨化高粱次之,高粱最差,以膨化高粱和高粱作为淀粉源生产水产膨化饲料时需要较高的调质水分。Vanier等^[51]研究膨化大米、豆类和玉米发现,大米的膨化效果最好。李重阳^[52]也比较了小麦粉、大米和马铃薯淀粉作为淀粉源对膨化饲料品质的影响,发现大米粉的膨化度最大,马铃薯淀粉次之,小麦粉最小。这是因为大米淀粉中几乎全为支链淀粉,膨化效果较好;马铃薯淀粉颗粒结构松散,且支链淀粉含有带负电荷的磷酸酯基,因此能快速吸水膨胀,磷酸酯基能促进淀粉的老化,使淀粉充分包裹住糊化时吸收的水分,膨化后样品具有较好的质构^[53]。因此,应该根据不同种类水产膨化饲料的要求,选择合适的淀粉源,进行水产膨化饲料的加工。

5 结语

近几年来,随着我国水产养殖品种的不断增长,对水产膨化饲料的要求也越来越高。但

鱼类是天生的糖尿病患者, 尤其是肉食性鱼类对淀粉的利用能力有限^[54-55]。所以, 低淀粉水产膨化饲料是未来的发展方向, 而淀粉含量降低会增加膨化难度, 如增加能耗和非正常停机等。因此, 针对水产膨化饲料, 适量添加块茎类淀粉, 可以提高膨化饲料的膨化度和水中稳定性。

参考文献:

- [1] 刘凡, 李艳芳. 挤压膨化技术在水产饲料生产中的应用[J]. *广东饲料*, 2016(11): 37-39.
Liu F, Li Y F. Application of extrusion technology in aquatic feed production[J]. *Guangdong Feed*, 2016(11): 37-39(in Chinese).
- [2] 徐倩. 水产饲料膨化技术与应用创新[J]. *广东饲料*, 2017(7): 8.
Xu Q. Aquatic feed extrusion technology and application innovation[J]. *Guangdong Feed*, 2017(7): 8(in Chinese).
- [3] 汪沐, 过世东, 李军国, 等. 挤压膨化技术在水产饲料生产中的应用[J]. *饲料与畜牧*, 2011(3): 12.
Wang M, Guo S D, Li J G, *et al.* Application of extrusion technology in aquatic feed production[J]. *Feed and Animal husbandry*, 2011(3): 12(in Chinese).
- [4] Cheng Z J, Hardy R W. Effects of extrusion processing of feed ingredients on apparent digestibility coefficients of nutrients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture nutrition*, 2003, 9(2): 77-83.
- [5] 吴千茂. 探讨低淀粉膨化, 沉性料的稳定控制技术[J]. *海洋与渔业·水产前沿*, 2017, 2: 86-88.
Wu Q M. Study on the stability control technology of low starch extrusion and sinking aquatic feed[J]. *Ocean & Fishery: Fish First*, 2017, 2: 86-88(in Chinese).
- [6] 金征宇. 挤压膨化与后添加技术在饲料工业中的应用(1)[J]. *饲料广角*, 2005, 3: 31-34.
Jin Z Y. Application of extrusion and post-addition technology in feed industry. (1)[J]. *Feed China*, 2005, 3: 31-34(in Chinese).
- [7] 张立彦, 芮汉明, 李作为. 淀粉种类及其组成对微波膨化的影响[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2000, 13.4(4): 23-27.
Zhang L Y, Rui H M, Li Z W. Effects of the varieties and chemical composition of starch on microwave expanding[J]. *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 2000, 13.4(4): 23-27(in Chinese).
- [8] Dhital, S, Warren, F J, Butterworth, P J, *et al.* Mechanisms of starch digestion by α -amylase-Structural basis for kinetic properties[J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2017, 57(5): 875-892.
- [9] Van Soest J J G, Borger D B. Structure and properties of compression-molded thermoplastic starch materials from normal and high-amylose maize starches[J]. *Journal of applied polymer science*, 1997, 64(4): 631-644.
- [10] 卢敏, 殷涌光. 稻米直链淀粉研究进展[J]. *食品科技*, 2005(8): 5-8.
Lu M, Yin Y G. Advance in the research of rice amylose and separate technology[J]. *Food Science and Technology*, 2005(8): 5-8(in Chinese).
- [11] Liu H, Yu L, Simon G, *et al.* Effects of annealing on gelatinization and microstructures of corn starches with different amylose/amylopectin ratios[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3): 662-669.
- [12] Xie F, Yu L, Su B, *et al.* Rheological properties of starches with different amylose/amylopectin ratios[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(3): 371-377.
- [13] 张艳霞, 丁艳锋, 李刚华, 等. 直链淀粉含量不同的稻米淀粉结构、糊化特性研究[J]. *作物学报*, 2007, 33(7): 1201-1205.
Zhang Y X, Ding Y F, Li G H, *et al.* Starch structure and paste property of rice with different amylose content[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(7): 1201-1205(in Chinese).
- [14] Chinnaswamy R, Hanna M A. Relationship between amylose content and extrusion-expansion properties of com starches[J]. *Cereal Chemistry*, 1988, 65(2): 138-143.
- [15] Della Valle G, Vergnes B, Colonna P, *et al.* Relations between rheological properties of molten starches and their expansion behaviour in extrusion[J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 31(3): 277-295.
- [16] 汤坚, 丁霄霖. 玉米淀粉的挤压研究-淀粉在挤压过程中降解机理的研究 (II a)[J]. *无锡轻工业学院学报*, 1992, 11(2): 95-103.
Tang J, Ding X L. Studies on the extrusion of corn starches -the degradation mechannim of corn starches during extrusion(II a)[J]. *Journal of the Xuxi Institute of Light Industry*, 1992, 11(2): 95-103(in Chinese).
- [17] 刘林三. 不同直链淀粉含量玉米的淀粉合成基因表达、淀粉结构与膨化特征分析[D]. 西北农林大学, 2018.

- Liu L S. Analysis of starch synthesis gene expression, starch molecular structure and extrusion characteristics of maize with different amylose content[D]. Northwest A&F University, 2018(in Chinese).
- [18] Le Corre D, Bras J, Dufresne A. Starch nanoparticles: a review[J]. *Biomacromolecules*, 2010, 11(5): 1139-1153.
- [19] Pérez S, Bertoft E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review[J]. *Starch-Stärke*, 2010, 62(8): 389-420.
- [20] 李岫怡, 杨桂芹, 郭东新. 不同来源淀粉的组成, 结构及其在动物生产上的应用研究进展[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(3): 1053-1060.
- Li X Y, Yang G Q, Guo D X. Research progress on composition, structure and application of different starch sources in animal production[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(3): 1053-1060(in Chinese).
- [21] Baldwin P M, Adler J, Davies M C, *et al.* Holes in starch granules: confocal, SEM and light microscopy studies of starch granule structure[J]. *Starch - Stärke*, 1994, 46(9): 341-346.
- [22] Huber K C, BeMiller J N. Channels of maize and sorghum starch granules[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 41(3): 269-276.
- [23] Kim H S, Huber K C. Channels within soft wheat starch A-and B-type granules[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(1): 159-172.
- [24] Chen P, Yu L, Simon G P, *et al.* Internal structures and phase-transitions of starch granules during gelatinization[J]. *Carbohydrate polymers*, 2011, 83(4): 1975-1983.
- [25] Jiang H, Campbell M, Blanco M, *et al.* Characterization of maize amylose-extender (ae) mutant starches: Part II. Structures and properties of starch residues remaining after enzymatic hydrolysis at boiling-water temperature[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 80(1): 1-12.
- [26] Zhang G, Ao Z, Hamaker B R. Slow digestion property of native cereal starches[J]. *Biomacromolecules*, 2006, 7(11): 3252-3258.
- [27] Ratnayake, W, Jackson, D. Starch: sources and Processing. In: *Encyclopaedia of food science and nutrition* (Wrolstand, R. E. ed.), Revised, 2nd edn[M]. 2003, 5567-5572, John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.
- [28] 杨毅才. 淀粉糊化的过程及影响因素[J]. *农产品加工*, 2009(2): 18-19.
- Yang Y C. The influencing factors on starch gelatinization process[J]. *Farm Products Processing*, 2009(2): 18-19(in Chinese).
- [29] Atwell W A, Hood L F, Lineback D R, *et al.* The terminology and methodology associated with basic starch phenomena[J]. *Cereal Foods World*, 1988, 33: 306-311.
- [30] Thomas M, Van der Poel A F B. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 61(1): 89-112.
- [31] 艾志录, 孙茜茜, 潘治利, 等. 不同来源淀粉特性对水晶皮质构品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 318-324.
- Ai Z L, Sun Q Q, Pan Z L, *et al.* Effect of different starch source properties on crystal leather textural quality[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(1): 318-324(in Chinese).
- [32] 付一帆, 甘淑珍, 赵思明. 几种淀粉的糊化特性及力学稳定性[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 255-257.
- Fu Y F, Gan S Z, Zhao S M. Gelatinization characteristics and mechanical stability of various starch sources[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 255-257(in Chinese).
- [33] 贾玉涛. 不同来源淀粉的提取及糊化性质研究[D]. 山东农业大学, 2007.
- Jia Y T. The extraction and pasting properties of different sources of starch[D]. Shandong Agricultural University, 2007(in Chinese).
- [34] 傅晓丽, 王顺喜, 龙蕾. 不同因素对淀粉糊化特性的影响[J]. *饲料工业*, 2012(3): 54-57.
- Fu X L, Wang S X, Long L. Effects of different factors on starch gelatinization properties[J]. *Feed Industry*, 2012(3): 54-57(in Chinese).
- [35] 陈洁, 郭泽银, 刘贵珍, 等. 超声波处理木薯淀粉对其流变特性的影响[J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2013(1): 86-92.
- Chen J, Guo Z B, Liu G Z, *et al.* Rheological properties of cassava starch treated by ultrasonic[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2013(1): 86-92(in Chinese).

- [36] 王颖, 罗志刚, 罗发兴. 瓜尔胶对木薯淀粉糊流变特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010(10): 39-41.
Wang Y, Luo Z G, Luo F X. Effect of guar gum on rheological properties of tapioca starch past[J]. Food and Fermentation Industries, 2010(10): 39-41(in Chinese).
- [37] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 陕西科技大学, 2017.
Dong B B. Pasting, rheological properties and the relationship with gel properties of eight kinds of starch[D]. Shaanxi University of Science and Technology, 2017(in Chinese).
- [38] 王磊, 毛春玲, 王然, 等. 玉米淀粉糊流变特性研究[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(10): 45-48.
Wang L, Mao C L, Wang R, *et al.* Study on rheological properties of corn starch paste[J]. Cereals & Oils, 2014, 27(10): 45-48(in Chinese).
- [39] 刘晓媛, 熊旭红, 曾洁, 等. 湿热处理对甘薯淀粉流变特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(10): 78-86, 92.
Liu X Y, Xiong X H, Zeng J, *et al.* Effects of heat-moisture treatment on rheological properties of sweet potato starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(10): 78-86, 92(in Chinese).
- [40] 何钢, 谢碧霞, 谢涛. 淀粉品质特性研究进展[J]. 经济林研究, 2003, 21(4): 112-116.
He G, Xie B X, Xie T. The developments of research on starch properties[J]. Economic Forest Research, 2003, 21(4): 112-116(in Chinese).
- [41] Yoshitomi B. Effect of extrusion cooking temperature on the microstructure of extruded pellets[J]. Fisheries Science, 2004, 70(6): 1157-1163.
- [42] Faubion J M, Hoseney R C. High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties[J]. Cereal Chemistry, 1983, 44(1): 85.
- [43] Podoskina T A, Podoskin A G, Bekina E N. Efficiency of utilization of some potato starch modifications by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture, 1997, 152(1-4): 235-248.
- [44] Venou B, Alexis M N, Fountoulaki E, *et al.* Effect of extrusion of wheat and corn on gilthead sea bream (*Sparus aurata*) growth, nutrient utilization efficiency, rates of gastric evacuation and digestive enzyme activities[J]. Aquaculture, 2003, 225(1-4): 207-223.
- [45] 袁军, 薛敏, 吴立新, 等. 不同淀粉源对膨化饲料颗粒质量及吉富罗非鱼表观消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(8): 2209-2216.
Yuan J, Xue M, Wu L X, *et al.* Effects of different starch sources on pellet quality of extruded feed and apparent digestibility of genetic improvement of farmed Tilapia (*Oreochromis niloticus*, GIFT)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(8): 2209-2216(in Chinese).
- [46] Ah-Hen K, Lehnebach G, Lemus-Mondaca R, *et al.* Evaluation of different starch sources in extruded feed for Atlantic salmon[J]. Aquaculture Nutrition, 2014, 20(2): 183-191.
- [47] Alvarezmartinez L, Kondury K P, Harper J M A. General model for expansion of extruded products[J]. Journal of Food Science, 2010, 53(2): 609-615.
- [48] Glencross B, Blyth D, Tabrett S, *et al.* An assessment of cereal grains and other starch sources in diets for barramundi (*Lates calcarifer*)-implications for nutritional and functional qualities of extruded feeds[J]. Aquaculture Nutrition, 2012, 18(4): 388-399.
- [49] Kannadhasan S, Muthukumarappan K. Effect of starch sources on properties of extrudates containing DDGS[J]. International Journal of Food Properties, 2010, 13(5): 1012-1034.
- [50] 张嘉琪. 缓沉性水产膨化饲料加工参数和高粱作为淀粉源对水产膨化饲料产品质量的影响研究[D]. 中国农业科学院饲料研究所, 2019.
Zhang J Q. Study on influence of processing parameters of slow-sinking aquatic feed and effect of sorghum as starch source on quality of aquatic feed[D]. Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019(in Chinese).
- [51] Vanier N L, Vamadevan V, Bruni G P, *et al.* Extrusion of Rice, Bean and Corn Starches: Extrudate Structure and Molecular Changes in Amylose and Amylopectin[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(12): E2932-E2938.
- [52] 李重阳. 不同膨化工艺参数及淀粉源对犬粮加工质量的影响[D]. 河北工程大学, 2019.
Li C Y. Effects of different extrusion process parameters and starch sources on processing quality of dog food[D]. Hebei University of Engineering, 2019(in Chinese).
- [53] 张淼, 吕芬, 李妍, 等. 常用淀粉对微波膨化玉米片品质影响及工艺参数优化研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(1): 32-35.
Zhang M, Lv F, Li Y, *et al.* Study on the effect of

- common starch to microwave puffing corn chips and optimization of its processing parameters[J]. *Food & Machinery*, 2009, 25(1): 32-35(in Chinese).
- [54] Hemre G I, Mommsen T P, Krogdahl Å. Carbohydrates in fish nutrition: effects on growth, glucose metabolism and hepatic enzymes[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2002, 8(3): 175-194.
- [55] Moon T W. Glucose intolerance in teleost fish: fact or fiction?[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2001, 129(2-3): 243-249.

Research progress on the effects of different starch sources on processing and quality characteristics of extruded aquatic feed

YANG Jie¹, LI Junguo^{1,2}, XU Chuanxiang¹, WANG Hao¹, MA Shifeng¹, XUE Min^{1*}

(1. *Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Feed Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)*

Abstract: Starch plays a very important role in the processing of extruded aquatic feed. It can not only enhance the stickiness of mash feed, but also play a dual role of expansion and adhesion in extruded feed. Due to the different granular structure of starch from different sources, the effects on the processing and quality of extruded aquatic feed are also different. This paper reviewed the research progress on the relationship between the basic characteristics of different starch sources and the processing and quality characteristics of extruded aquatic feed. The differences of starch components, structure, gelatinization properties, rheological properties and thermodynamic properties of different starch sources were analysed. The effects of different starch sources on the quality characteristics of extruded aquatic feed were compared. In addition, the problems and development directions of different starch sources in the research process were prospected.

Key words: different starch sources; composition and structure; processing characteristics; extruded feed; research progress

Corresponding author: XUE Min. E-mail: xuemin@caas.cn

Funding projects: Beijing Natural Science Foundation (6194043); Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institute (1610382019002, 1610382017015); Agricultural Science and Technology Innovation Program (CAAS-ASTIP-2017-FRI-08); National Key R&D Program of China (2016YFF020180, 2018YFD0900400), Beijing Technology System for Sturgeon and Salmonids (BAIC08-2019)