干制对淀粉特性及其制品品质的影响

叶发银， 陈 嘉， 陈厚荣， 周 韵， 赵国华*

（1. 西南大学 食品科学学院，重庆 400715；2. 川渝共建特色食品重庆市重点实验室，重庆 400715）

摘要： 干制是淀粉原料及其制品加工的常用手段。淀粉原料（块根、块茎、籽粒等）通过干制预处理，不仅便于安全保藏和后续加工，而且显著提高了淀粉提取率和加工适性。在淀粉基食品（粉条、粉丝、虾味片等）生产中，干燥是必要环节，对产品品质有决定性作用。干制过程复杂，涉及水分迁移、热量传递以及其他物理化学变化（如淀粉分子链重结晶、淀粉与其他共存成分相互作用），这使生产中干制的经验性仍多于科学性。因此，作者全面总结和分析了干制对原料中淀粉特性以及淀粉基食品品质的影响及规律，为通过选择干制方式及干制条件来改善淀粉原料加工适性及干制淀粉基食品的品质提供参考。

关键词： 淀粉；干制；加工特性

中图分类号：TS 231　**文章编号：**1673-1689(2022)12-0019-11　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.12.003

Effect of Drying on Starch Properties and Starchy Product Quality: A Review

YE Fayin， *CHEN Jia*， *CHEN Hourong*， *ZHOU Yun*， *ZHAO Guohua**

（1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China；2. Chongqing Key Laboratory of Speciality Food Co-Built by Sichuan and Chongqing，Chongqing 400715, China）

Abstract： Drying is a common procedure frequently used to process starchy raw materials and their products. The pretreatment of starchy raw materials such as roots, tubers, and grains by drying is not only convenient for safe preservation and subsequent processing, but also significantly promotes the yield of starch extraction and the processing suitability of starch. Drying is a necessary procedure in the production of starchy foods such as starch noodles, vermicelli, shrimp crackers, and so on, playing a decisive role in the quality of starchy products. Drying is a complex process involving moisture transfer, heat transfer and other accompanying physicochemical changes (i.e., recrystallization of starch molecular chains, interactions between starch and other coexisting components), which makes the drying process is more empirical than scientific in industrial production. Therefore, we comprehensively summarized and analyzed the effects and rules of drying on the characteristics of starch in raw materials and the quality of starchy products, providing

收稿日期： 2022-07-01

基金项目： 国家自然科学基金项目（31871837）；国家重点研发计划项目（2021YFD2100101）；重庆市自然科学基金面上项目（CSTB2022NSCQ-MSX0331）。

* **通信作者：** 赵国华（1971—），男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事非消化性碳水化合物化学与营养方面的研究。E-mail：zhaoguohua1971@163.com

references in improving the processing suitability of starchy raw materials and the quality of dried starchy foods through the selection of drying modes and conditions.

Keywords: starch, drying, processing characteristics

干制是食品工业中频繁使用但其过程机制尚未完全明晰的加工单元操作。生产经验表明,干制品的品质与干制工艺条件密切相关[1-2]。原因在于,干制不仅是一个简单脱水过程,而且涉及食品组分结构的复杂变化。在干制过程中,伴随着水分含量持续下降,食品组织中溶液浓缩及渗透压增加,食品组分(淀粉、蛋白质等)的构象和链结构以及它们通过相互作用形成的织态结构也随之进行着动态演变[3]。当干制需要热量参与时(如热风干燥、流化床干燥等),一些化学反应(如淀粉降解、脂质氧化)会因此而加速。采取过高温度干燥还会造成谷物籽粒热损伤,使其加工适性下降[4],对于面条、面片等谷物制品则会造成淀粉、蛋白质等组分变性或功能性质改变,从而影响其品质[5]。因此,干制不仅要从时间、效率等方面考虑,还要从保证产品的品质上确定工艺条件,这使得高质量干制成为当前食品工业面临的一项挑战。

归纳起来,干制对于淀粉原料及其制品加工至少有 3 方面的有益作用:1)原料及产品安全保藏的需要。薯类块根、谷物籽粒等经干燥后可长时间保存[6]。通过干制降低水分活度(A_w),可减少微生物腐败、霉变或不期望的化学反应发生。2)干制可使原料加工适性得到提升。例如,传统上将湿木薯淀粉进行晾晒是必需的加工预处理环节,这可以使木薯淀粉具有良好的烘焙膨化特性[7]。3)干制是淀粉制品品质形成的关键加工步骤。以粉条(丝)生产为例,经验表明,晾晒对传统粉条(丝)的品质十分重要,其品质特性依赖于气象条件[8]。在粉条(丝)干制过程中,淀粉重结晶和淀粉凝胶收缩速度受干燥介质温湿度的影响显著[2,9]。目前,干制技术广泛应用于淀粉原料采后贮藏、淀粉提取与加工、淀粉基食品生产等环节,已成为一项加工共性关键技术(见图 1)。随着新技术在食品领域不断渗透融合,干制技术也在不断迭代更新[10]。从晾晒、阴干和风干等传统的干制技术,到转鼓干燥、喷雾干燥、真空干燥、低压过热蒸气干燥、红外干燥、微波干燥等各种现代化的干燥方法,淀粉原料及其制品的干燥效率、产品品质得到了大幅提升,同时为新产品研发铺平了道路。喷雾干燥技术可实现各种加工特性淀粉颗粒的人工制备。Santos 等报道喷雾干燥可获得更高品质的预糊化木薯淀粉[11]。Yun 等采用喷雾干燥法制备的抗性淀粉(含大米直链淀粉-米糠油复合物)粉末,相比于热风烘干后经研磨过筛得到的粉末,容积密度更低而抗性淀粉含量更高[12]。研究发现[13],超临界干燥可以显著提升淀粉基气凝胶的性能。作者在充分调研该领域研究成果的基础上,论述干制对淀粉原料及其制品的影响,汇总新型干燥技术在改善淀粉原料加工特性及产品品质的相关案例,以期为淀粉及淀粉制品加工业更好地利用干制技术提供参考。

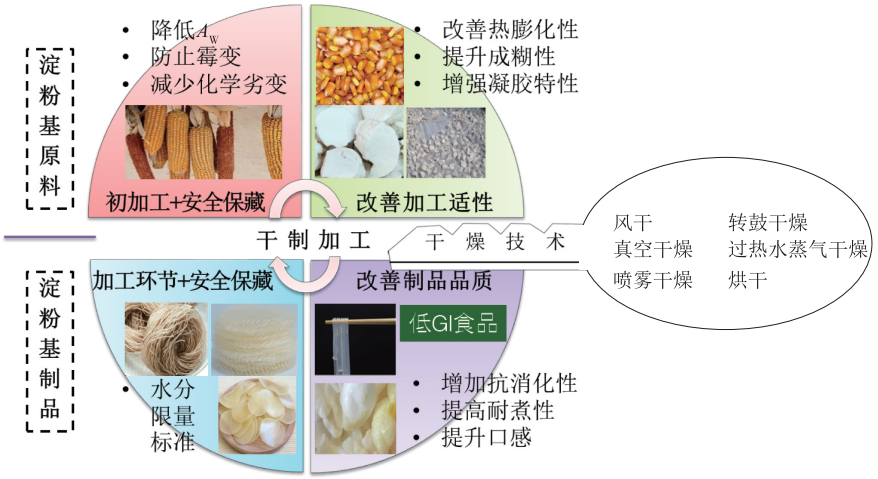


图 1　干制在淀粉原料处理及其制品加工中的作用

Fig. 1　Role of drying in the processing of starchy raw materials and the fabrication of starchy products

1 干制对原料淀粉特性的影响

为便于讨论,将加工原料分为淀粉基原料和湿淀粉两类。前者主要包括各类富含淀粉的籽粒、块根和块茎等作物器官或组织;后者主要包括提取的天然淀粉颗粒。

1.1 干制对淀粉基原料特性的影响

淀粉基原料干制主要有两类目的,一类是天然淀粉基原料(谷物籽粒、块茎或块根等),为了安全保藏需要干燥到安全水分限以下;另一类是人工重组型原料,为了造粒通常需要采取喷雾干燥等方式进行处理。干制对原料中淀粉特性的影响见表 1。

表 1 干制对原料中淀粉特性的影响

Table 1 Effect of drying on starch properties in raw materials

原料	干制方式	干制条件	结构特性	糊化特性	消化特性	参考文献
大米	晒干	气温 25~35 ℃,晒 48 h,每 2 h 翻动一次	RC 为 19.47%	PV 为 195.9;FV 为 250.8;SB 为 1 321.2 mPa·s	—	[6]
	连续式干燥	40 ℃及 100 ℃干燥,风速 1.0 m/s	RC 为 21.97%、20.35%	干燥温度提高使淀粉的 FV 和 SB 降低		
	间歇式干燥	温度梯度 70、90、110 ℃,干燥 10 min 停歇 30 min	RC 为 19.59%	PV 为 227.6,FV 为 235.7,SB 为 1 020 mPa·s		
大米	晒干	420 min	RC 为 39.51%	PV、FV、SB 均低于 40 ℃热风干燥组	米饭中 RS 质量分数 0.97%	[14]
	热风干燥	40~115 ℃,39~350 min	RC 为 36.28%~38.22%,温度升高使 RC 降低	随着干燥温度升高,PV、FV、SB 均降低	米饭中 RS 质量分数 2.66%,温度升高使 RS 升高	
大米	风干	自然通风,至水分含量降低到 14.4%(质量分数)	短程有序度不及红外辐照组,RC 为 25.2%	大米粉 PV、TV、FV 升高,35 ℃储藏 8 个月,FV 升高	—	[10]
	红外辐照	2 780 W/m^2,距辐射装置 20 cm,升温到 60 ℃取出	淀粉的短程有序度提高,RC 为 26.8%	大米粉 PV、TV、FV 升高,35 ℃储藏 8 个月,FV 升高		
大米	间歇式干燥	每次 1 h,循环 14 次,中间停歇 30 min	长时间加热使 RC 降低 30.85%~32.60%	—	—	[15]
玉米	热风干燥	30、50、70、90 ℃	结晶度未受影响	温度升高使糊化温度、SB 升高,PV 及 BD 降低	—	[16]
玉米	流化床干燥	54~130 ℃	—	温度升高使糊化温度升高,PV 降低,FV 先升后降	—	[17]
高粱	热风干燥	温度 60、65、70 ℃,时间 30、180 min	干燥时间增加使直链淀粉含量升高	—	—	[18]
高粱	热风干燥	45、65、85 ℃	45、65 ℃干燥样品 RC 高于 85 ℃干燥样品	温度升高使 BD 降低,FV 和 SB 升高	—	[19]
山药	热风干燥	风速 1.0 m/s,RH 20%,40~80 ℃;20~48 h 组合	温度升高使短侧链比例升高(11.6%~15.4%)	干燥温度升高使 PV、FV、SB 升高	—	[20]
	微波冷干燥	−25 ℃冷冻 8 h 后干燥,2.4 W/g,50 Pa,−40 ℃,16 h	短侧链占比 17.0%	PV、FV、SB 较鲜样升高		

续表 1

原料	干制方式	干制条件	结构特性	糊化特性	消化特性	参考文献
山药	真空冻干	20~300 Pa,-60 ℃干燥 52 h	AM 17.27 g/hg,RC 为 15.80%	与鲜样比,冻干使糊化焓、BD 降低,FV 不变	—	[21]
	热风烘干	60 ℃, 风速 0.15 m/s, 10 h	AM 16.20 g/hg,RC 为 18.93%	烘干使糊化焓、FV、SB 升高,BD 降低		
	亚临界干燥	二甲醚,45~50 ℃,0.5~0.7 MPa,10 min,4 个循环	AM 15.74 g/hg,RC 为 18.64%	干燥使糊化焓、FV、SB 升高,BD 降低		
板栗	风干	15~25 ℃,RH 20%~40%	风干 2 周后,AM 升高,RC 降低	—	风干 4 周 eGI 降低了 6.3%	[22]
板栗	风干	25 ℃,RH 50%、70%、90%	AM 升高,总淀粉降低;淀粉分子降解、RC 降低	较鲜样,风干使糊化焓降低	RS 无显著变化	[23]
	烘干	40 ℃(RH 14%)、50 ℃(RH 10%)	较鲜样,烘干使 RC 降低	较鲜样,烘干使糊化焓降低	RS 无显著变化	
香蕉	烘干	50 ℃,7 h;80 ℃,4 h;110 ℃,2 h	50 ℃烘干样的 AM 及 RC 高于 80、110 ℃	温度升高使糊化焓降低(19.48~11.7 J/g)	低温有益,50 ℃烘干,RS 质量分数 44.58%	[24]
	真空冻干	-30 ℃冷冻 4 h 后进行真空干燥,48 h	RC 质量分数 48.34%	糊化焓最大(23.16 J/g)	RS质量分数46.72%	
香蕉	热风干燥	温度 52~58 ℃,风速 1.4~0.6 m/s	—	糊化焓未受干燥影响	RS 为 40.9 ~58.5 g/hg,55 ℃干燥使 RS 升高	[25]

注:—表示未提供;DP 表示聚合度;RH 表示相对湿度;RC 表示相对结晶度;AM 表示直链淀粉;PV 表示峰值黏度;BD 表示崩解值;FV 表示最终黏度;SB 表示回升值;RS 表示抗性淀粉;eGI 表示预估血糖生成指数。

1.1.1 *干制对原料中淀粉理化特性的影响* 粮食作物在采收及储藏期间的水分控制对于安全储藏至关重要。稻谷收获时的水分含量(质量分数)一般为 20%~24%(以湿基质量计), 需要及时干燥至安全水分限(11%,以湿基质量计)以下。虽然较高的干燥温度(>60 ℃)可缩短干燥时间,但是研究发现选择干燥温度时还必须考虑其对原料中淀粉特性的影响[26]。实际上,干燥方式、干燥过程、干燥程度都会影响淀粉基原料(谷物籽粒、块根、块茎等)的加工品质,包括碾磨加工适性(出米率、出粉率)、淀粉提取率以及淀粉的特性等。

干制预处理能够影响原料中淀粉的提取。Ramos 等研究发现,经过 100 ℃连续式干燥的红米,其淀粉提取率降低,淀粉颗粒中残留蛋白质含量增加,淀粉颗粒表面呈现暗红色;研究还发现提取的红米淀粉纯度越高,制作的淀粉凝胶在冰箱中的稳定性越强[6]。成军虎等分别采取热风干燥和真空干燥处理玉米,按照相同湿法工艺提取淀粉。结果表明,在相同干燥温度下,真空干燥玉米的淀粉得率高于热风干燥玉米的淀粉得率,而淀粉中蛋白质含量则低于热风干燥法提取的蛋白质含量;随着干燥温度升高(50~90 ℃),两种干燥方式的玉米淀粉得率均降低而淀粉颗粒中蛋白质含量增加[27]。研究认为高温导致蛋白质变性是造成蛋白质脱除困难、淀粉得率下降的主要原因。Ziegler 等研究发现,热风干燥能够影响红爆米花的淀粉提取率, 与 40 ℃热风干燥相比,在 100 ℃干燥的样品淀粉提取率下降 13.14%[28]。Malumba 等用不同温度的流化床干燥玉米籽粒,接着采用湿磨工艺提取淀粉,研究发现,随着干燥温度升高(60~130 ℃),淀粉提取率和纯度随之下降,当干燥温度超过 80 ℃时,淀粉中残留蛋白质含量随着干燥温度升高而缓慢增加,但是 130 ℃干燥处理组的淀粉纯度仍达到 95.4%[17]。

干制预处理能够影响淀粉的颗粒特性和化学组成。Duan 等研究了干制对山药淀粉的影响,研究发现不同干制方式处理的山药,提取的淀粉具有不同的特性且存在分子结构上的差异,微波干燥造成支链淀粉分子的降解,短侧链比例增加,热风干燥

同样造成淀粉分子降解,降解程度随温度升高而加剧[20]。Odunmbaku 等考察了干燥温度(60、65、70 ℃)和干燥时间(30、180 min)对高粱籽粒中淀粉的影响,结果表明,直链淀粉含量随着干燥时间延长而增加[18]。He 等分别采用热风干燥、真空干燥和真空冷冻干燥对蛋黄果进行干制,然后按照相同方法从中提取淀粉。研究发现干燥预处理影响了蛋黄果淀粉的粒度分布和淀粉颗粒形态。真空冷冻干燥样品中小颗粒淀粉的提取率更高,样品的中值粒径为17.23 μm,仅为热风干燥和真空干燥样品的 1/3,这表明干燥预处理方式影响了后续淀粉的提取;研究还发现,热风干燥或真空干燥使淀粉颗粒表面出现裂隙和碎片[29]。Wang 等对比了风干、烘干(40、50 ℃)对板栗淀粉性质的影响,与新鲜板栗相比,风干板栗的内源淀粉酶活性及直链淀粉含量增加,而总淀粉含量降低;同时观测到淀粉分子降解、相对结晶度和淀粉的短程有序度降低[23]。总之,干制过程中原料内源酶活性变化、淀粉与其他成分的相互作用强度的改变等,会最终反映到原料中淀粉组成和特性上。

干制预处理能够影响淀粉的结构特性。Maldaner 等对稻谷采取间歇式干燥(每次 1 h,循环 14 次),结果表明,随着干燥循环次数和热风温度增加,大米淀粉的结构遭受破坏,结晶度从 32.60%逐步下降至 30.85%[15]。Luo 等将粳米(初始水分含量 18.6%(质量分数))分别采取风干和红外辐照两种方法干制,使水分含量下降至 14.2%~14.4%(质量分数),按照相同方法碾磨成粳米粉,研究发现,红外辐照使粳米粉中淀粉的短程有序度增加,相对结晶度高于风干样品组,且在贮藏期内延缓了相对结晶度的下降[10]。Ramos 等研究了晒干、连续式干燥(40 ℃及 100 ℃)、间歇式干燥对红米粉及红米淀粉品质的影响,结果表明,在更高温度下进行干燥处理,可使淀粉的相对结晶度增加[6]。Liu 等将新鲜山药切片后,采取不同方式(真空冻干、热风烘干、亚临界流体脱水)干燥,粉碎后提取淀粉,结果发现,热风烘干使山药淀粉形成更多有序结构,而真空冻干和亚临界流体脱水降低了山药淀粉的结构有序性,并且真空冻干淀粉的结晶度最低,热风烘干淀粉的结晶度最高[21]。He 等对蛋黄果进行干燥预处理后提取淀粉,虽然淀粉的晶型没有发生变化,但淀粉的有序结构受到了一定影响,真空干燥促进了蛋黄果淀粉粒中双螺旋结构形成,而热风干燥和真空冷冻干燥在一定程度上破坏了有序结构[29]。

干制预处理能够影响淀粉的加工特性。Su 等研究了热空气干燥和红外干燥对裸大麦粉和淀粉性能的影响,结果发现发芽处理结合红外干燥可显著提升裸大麦粉的加工性能,主要表现为裸大麦粉的容积密度和溶解性增加、持油性降低,研究认为淀粉颗粒表面结构变得松散、淀粉结晶度下降和淀粉分子降解是其内在原因[30]。Malumba 等研究了干燥温度(60~130 ℃)对湿磨提取玉米淀粉特性的影响,在较高温度下(>100 ℃)干燥预处理的玉米籽粒,提取的淀粉具有较低的膨胀性和水溶性,同时淀粉的成糊性及淀粉糊的性质发生变化,淀粉糊呈现剪切变稀的特征,屈服应力随着干燥温度升高而降低[17]。也有研究者探究了干燥温度(30、50、70、90 ℃)对提取的玉米淀粉加工特性的影响,结果显示,随着干燥温度升高,3 个品种玉米淀粉的糊化温度、凝胶硬度随之升高,而糊化焓、热糊黏度、冷糊黏度、崩解值、回升值等其他糊化性质的参数随干燥温度的变化因品种而异,无统一规律等[16]。Ziegler 等研究发现对红爆米花进行热风干燥影响其淀粉的加工特性,当干燥温度为 30~70 ℃时,提取淀粉的糊化特性未受影响,但干燥温度为 100 ℃时,高温干燥降低了直链淀粉的溶出,增强了淀粉颗粒的热稳定性,以致淀粉的峰值黏度和崩解值显著降低,而糊化温度、最终黏度和回升值显著升高[28]。Ramos 等研究发现干燥预处理方式能够影响红米粉及红米淀粉的品质,结果表明,在更高温度下进行干燥预处理,红米淀粉的起始糊化温度(T_o)增加,溶解性、膨胀性和糊化温度区间(ΔT)降低;当采取间歇式干燥时,红米粉的凝胶强度提升,而 40 ℃连续式干燥样品提取的淀粉具有最高的凝胶硬度;随着干燥温度增加,红米粉的最终黏度和回升值增加,而红米淀粉的最终黏度和回升值降低[6]。有研究者采取不同热风温度将高粱籽粒的水分含量从初始 22%左右降至 12.5%(质量分数),储藏一定时间后采取湿磨法提取淀粉,研究发现干燥温度(45、65、85 ℃)及储藏时间(0、3、6 个月)不影响淀粉的糊化温度,但是随着干燥温度升高,淀粉的膨胀性和崩解值降低;而随着贮藏时间延长,淀粉的峰值黏度下降、老化性能提升[19]。Luo 等将粳米分别采取风干和红外辐照两种方法干制后碾磨成粳米粉,研究发现,红外辐

照使粳米粉的峰值黏度、最终黏度增加，在经过 8 个月储藏后，红外辐照处理组的峰值黏度和最终黏度的变化幅度低于风干样品组，结果表明红外辐照干制是提升粳米储藏性能和改善粳米粉加工性能更有效的手段[10]。

1.1.2 干制对原料中淀粉消化特性的影响 消化特性是淀粉营养特性的主要体现。淀粉经人体消化酶水解为葡萄糖，之后进入循环系统，为人体提供能量。食物摄取后引起人体血糖升高程度通常用血糖生成指数(glycemic index，GI)表示，根据 GI 的大小将食物分为低 GI(<55)、中 GI(55~70)以及高 GI (>70)3 类。通过测定淀粉的体内和体外消化率，通常将淀粉划分为快消化淀粉 (rapidly digestible starch，RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch，SDS)和抗性淀粉(resistant starch，RS)，其中 SDS 和 RS 消化速率相对较慢，具有较低的 GI 值，这对维持餐后血糖稳定和改善胰岛素敏感性有益[31]。研究表明，干制会引起加工原料及制品中淀粉消化率的变化。

加工原料及制品中淀粉的消化率受干燥温度和时间的影响。Masato 等研究发现面条经高温干燥(90 ℃，6 h)可使 II 型抗性淀粉含量显著增加。此干燥温度在淀粉的玻璃化转变温度(T_g)之上、T_0 之下，面条中淀粉分子排列发生了物理重组，收紧淀粉结构并阻碍其膨胀，淀粉颗粒结构的变化降低了其消化率。对原料进行低温干燥也会引起淀粉消化率的降低[5]。Zhao 等研究发现风干(15~25 ℃，RH 20%~40%)可以降低板栗的 GI 值，随着风干时间的延长，板栗淀粉的相对结晶度未发生显著变化，但在风干 4 周时 X-射线衍射图谱上出现了 5.6°(2θ)衍射峰，这表明风干过程中板栗淀粉的结晶结构发生了改变；风干 4 周时板栗的 eGI 为 51.94，比新鲜板栗的 eGI 下降了 6.3%[22]。Ziegler 等将红爆米花颗粒在 100 ℃下进行干燥，淀粉的消化率较 40 ℃相比显著下降[28]。Tribess 等考察了热风干燥条件(温度、风速)对青香蕉粉中抗性淀粉含量的影响，发现抗性淀粉含量为 40.9%~58.5%(质量分数)，在相同温度(55 ℃)下，风速越小(1.4~0.6 m/s)，抗性淀粉含量越高；而相同风速(0.6 m/s)下，温度越高(52~58 ℃)，抗性淀粉含量越高[25]。

加工原料及制品中淀粉的消化率受干燥方式的影响。Donlao 等考察了不同干燥温度(40、65、90、115 ℃)下的淀粉，发现干燥预处理会影响非糯性长颗粒稻米的抗性淀粉比例[14]。Yang 等分别采取自然干燥(25 ℃，RH 50%，7 d)、热风干燥(50 ℃，12 h)、冷冻干燥(-45 ℃，24 h)、真空干燥(40 ℃，真空度-0.09~-0.1 MPa，24 h)处理板栗。结果表明，自然干燥、热风干燥、冷冻干燥及真空干燥板栗的全粉中抗性淀粉质量分数依次为：37.84、26.83、34.58、43.46 g/hg，这表明干燥方法会对板栗全粉中淀粉消化特性造成影响。热风干燥和冷冻干燥板栗全粉的 eGI 高于自然干燥的板栗全粉，而真空干燥板栗全粉的 eGI 低于自然干燥的板栗全粉。热风干燥的板栗全粉表现出最佳的淀粉抗消化性[32]。研究认为，这与干燥造成淀粉颗粒表面结构以及淀粉长程及短程有序结构的变化有关。冷冻干燥样品的 RC 较低，热风及真空干燥使 RC 及近程有序度升高，从而对消化酶的抗性增强。兰冬梅等将冻藏锥栗经微波处理后脱壳，再进行热风干燥，磨粉过筛得到锥栗粉，研究发现微波功率及时间、热风干燥温度及时间对锥栗抗性淀粉含量有显著影响，经响应面法优化后，微波-热风干燥组合使抗性淀粉达到 6.45 g/hg，是直接热风干燥所得锥栗粉中抗性淀粉的 6.32 倍，是经过相同条件微波处理但采取冷冻真空干燥所得锥栗粉中抗性淀粉的 1.32 倍[33]。后续研究发现，微波联合真空干燥使锥栗粉中抗性淀粉更高，达到 6.67 g/hg[34]。Khoozani 等采取烘干(50、80、110 ℃)或真空冻干制备香蕉全粉，结果表明，真空冻干样品的抗性淀粉最高(质量分数 46.72%)；对于热风烘干样品，50 ℃热风烘干时抗性淀粉达到最高 (质量分数 44.58%)，在此条件干燥样品的直链淀粉质量分数和结晶度也最高[24]。杜冰等将青香蕉打浆后分别采取热风烘干(50、100 ℃)、挤压干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥等方式处理，其中，真空冷冻干燥对香蕉抗性淀粉的保留率最高，其次是 50 ℃热风烘干和喷雾干燥，从生产角度喷雾干燥更适合于香蕉抗性淀粉的加工[35]。

1.2 干制对湿淀粉加工特性的影响

在淀粉生产中，通常对籽粒、块根、块茎等植物组织进行机械破碎处理、浸泡、沉淀(或过滤)，得到湿淀粉[17,36-37]。为便于后续保藏和加工，通常将湿淀粉进行干制[38-39]。本节讨论干制对湿淀粉加工特性的影响。

1.2.1 干制对湿淀粉颗粒特性的影响 唐小闲等发现干燥方式影响莲藕湿淀粉 (水分含量 40%(质

量分数),以湿基质量计)干制后的颗粒形态,其中微波干燥和真空微波干燥的莲藕淀粉在扫描电子显微镜下,颗粒轮廓清晰,表面光滑,无团聚;而热风干燥和红外干燥的莲藕淀粉表面粗糙,有颗粒出现裂缝和团聚等情况,且外观品质较差,这说明热风和红外干燥造成了莲藕淀粉颗粒损伤。进一步研究发现不同干燥方式得到的莲藕淀粉糊的透明度、凝沉性等方面存在较大差异[40]。有研究认为[41],湿磨制得的粉在干燥过程中,不适宜的干燥温度会造成淀粉的热损伤,并导致破损淀粉的含量增加。为获得较高品质的食用淀粉,国内较为成熟的湿淀粉干燥工艺一般采取气流干燥法。

1.2.2 干制对湿淀粉糊化特性的影响 Aviara 对比了晒干(气温 27~30 ℃,RH 50%~78%)和烘干(40、50、55、60 ℃)对湿木薯淀粉加工性能的影响,结果表明,烘干样品的峰值黏度高于晒干样品,50、55 ℃烘干对最终黏度无影响,仅在 40 ℃及 60 ℃下烘干时观测到最终黏度有所降低,但是烘干使回升值显著降低,60 ℃下烘干时样品的回升值下降 44%[42]。Alvarado 等对低地木薯提取的淀粉进行非发酵直接晒干(12 h)和烘干(40 ℃,24 h),研究发现二者在糊化温度、峰值黏度、最终黏度等糊化特性参数上,无显著差异(P>0.05);但对高地木薯提取的淀粉采用同样处理后,晒干样品的峰值黏度低于烘干样品(这表现出品种间的差异),而经过发酵预处理的木薯淀粉,干制方式会导致糊化特性有更大改变,对于发酵木薯淀粉,烘干样的崩解值低于晒干样,而烘干样的最终黏度、回升值高于晒干样;从淀粉糊特性黏度看,烘干样大于晒干样[43]。

1.2.3 干制对湿淀粉热膨化特性的影响 在巴西、哥伦比亚等国家,木薯淀粉是替代小麦粉制作烘烤食品的原料。无需酵母醒发,木薯淀粉制成粉团即可在烘焙过程中形成类似面包的结构[44]。相比马铃薯淀粉等其他天然淀粉,木薯淀粉表现出更好的热膨胀性能[45]。木薯淀粉经过自然发酵(20~30 d)转变为酸淀粉后,热膨胀性能还能得到显著提升[46]。因此,在制作一种无麸质烘焙木薯淀粉食品时,传统上主要以酸淀粉为原料[43]。研究发现,干制方式会影响酸淀粉的热膨胀性能。Mestres 等对木薯淀粉进行烘干(40 ℃,8 h),其烘焙膨胀性偏低(2.2 cm^3/g),而单独晒干或晒干–烘干组合处理的样品,烘焙膨胀性达到 6.2~6.6 cm^3/g(组间无显著差异),结果显示晒干对烘焙膨胀性质至关重要[7]。Qi 等研究指出,酸淀粉采取晒干方式,热膨化性能可显著提升,而采取烘干方式,热膨化性能与天然木薯淀粉无异[45]。晒干过程中酸淀粉暴露于紫外线下,这在一定程度上改变了淀粉分子的结构,湿木薯淀粉未经发酵直接晒干,热膨化性能不佳[47]。实际上,自然发酵–晒干组合是酸淀粉的传统生产方式。晒干酸淀粉在热膨化性能上的优势,为工业上采取烘干法替代传统晒干法带来了挑战。然而,自然发酵–晒干法在处理马铃薯淀粉上并未出现与木薯淀粉一致的结果[45],烘干或晒干对发酵后马铃薯淀粉的热膨化性能无显著影响,这说明热膨化性能改善效果因淀粉来源或淀粉原本的组成结构而异。

2 干制对淀粉制品品质的影响

为了便于讨论,本节所讨论的淀粉制品是以淀粉为主要配料,经糊化、凝胶化等淀粉组分变化制得的产品。这类产品包括:1)将淀粉糊化或部分糊化后立即干制,主要有预糊化淀粉、颗粒态冷水溶淀粉、藕粉及其他冲调类淀粉制品;2)将淀粉采取糊化或部分糊化的方式进行熟制,继而凝胶化成型,再进行干制得到产品,主要有粉条(丝)、粉皮、虾片等传统凝胶类淀粉制品,以及可食膜、气凝胶等产品。

2.1 糊化类淀粉制品

这类产品的共同特征是在保藏阶段应保持淀粉糊化的状态。预糊化淀粉是糊化类淀粉制品的典型产品。在工业生产上,预糊化淀粉主要采取转鼓(滚筒)干燥法生产。Fu 等将玉米淀粉在 64~72 ℃处理成部分预糊化淀粉,然后采取喷雾干燥将其加工成粉末,结果显示,喷雾干燥样品在电子显微镜下呈现良好的颗粒形态,相比于天然淀粉颗粒,其水合特性得到提升[48]。Santos 对预糊化木薯淀粉采取喷雾干燥,其崩解值降低、冷糊黏度增加,品质提升[11]。该学者后续研究了预糊化甘薯淀粉的喷雾干燥工艺,甘薯淀粉乳(质量分数 8%,以干基质量计)预糊化后进行喷雾干燥,粒度有所增加,67 ℃预糊化联合优化的喷雾干燥条件可生产性能良好的预糊化甘薯淀粉产品[49]。He 等研究发现,在喷雾干燥制备预糊化大米淀粉过程中,可引入各种食品胶来调节产品性能[50]。

2.2 凝胶类淀粉制品

2.2.1 传统凝胶类淀粉制品 传统凝胶类淀粉制品包括粉条(丝)、粉皮、虾味片等产品。传统上采取晾晒法进行干制,但受气候、季节、地理环境等因素的影响较大。有学者注意到[9],华北地区冬季适宜用传统方法加工甘薯粉丝,因为气候条件(5~15 ℃,RH 40%~50%)有益于甘薯淀粉老化和粉丝表面干燥,湿粉丝(条)在干燥阶段不断发生淀粉老化析水和干燥收缩,最终形成干粉丝(条);而在温暖的菲律宾(27~35 ℃,RH 80%~90%)难以加工甘薯粉丝(发黏,加工困难)。传统晾干粉丝(条)产品晶莹剔透,食味品质较佳,而现代化生产上主要采取烘干生产粉丝(条),坚实、致密性欠佳,品质有待改善。作者所在实验室研究发现[2],采用电烘箱热风干燥的样品外观皱缩无光泽、内部孔隙不均匀,粉条膨润度较大,弹性和咀嚼性偏低;但是在干燥过程中进行湿度控制后,粉条品质明显提升,研究发现热风温度 70 ℃,保持 RH 60%进行干燥,既便于粉条脱水,又可以使粉条品质与晾干粉条的品质接近。谢岩黎等研究发现马铃薯淀粉粉丝晶体特性及复水性受干燥温度的影响,在较低温度(30、40、50 ℃)干燥的粉丝老化程度较大,复水时间≥6 min,而60、70 ℃干燥的粉丝复水时间<6 min,复水效果好,但 80 ℃干燥的粉丝糊汤率高,研究认为干燥温度主要影响了粉丝的老化程度和晶格状态[51]。粉丝(条)、粉皮等产品在干燥过程中,淀粉凝胶中会发生水分迁移、淀粉老化以及凝胶骨架在应力下收缩等跨层次复杂变化,使这类产品的结构演变与品质形成的关联机制解析极具挑战[52]。

2.2.2 淀粉可食膜 糯米纸是淀粉可食膜的传统代表。淀粉具有良好的成膜性,在成膜过程中,淀粉分子发生重结晶。相关研究显示[53],干燥温度能够影响高直链玉米淀粉水分散体在成膜过程中淀粉重结晶的结构类型,60 ℃以下干燥得到的薄膜主要是 B 型结晶;60~100 ℃干燥的薄膜为 B 型、A 型和 V 型晶态体的混合物;100 ℃干燥制备的薄膜为 A 型结晶。Rindlava 等研究发现,在不同环境温度及空气湿度下可获得不同结晶结构的马铃薯淀粉膜。20 ℃干燥的马铃薯淀粉膜具有典型的 B 型结晶,空气湿度 92%制得的淀粉膜结晶度最高,空气湿度 58%制得的次之,空气湿度 25%得到的淀粉膜结晶度最低。随着环境温度升高,马铃薯淀粉膜的结晶度下降,68 ℃干燥的马铃薯淀粉膜几乎为无定型结构[54]。

2.2.3 淀粉基气凝胶 气凝胶是一类高孔隙率、高比表面积、低密度的材料,具有优异的阻隔性、良好的机械强度,在阻燃隔热、空气过滤、递释载体、吸附分离等领域具有广泛的用途[55]。淀粉是制备气凝胶的优良原料。脱除溶剂是气凝胶制备的关键环节,研究表明溶剂脱除方式会影响淀粉基气凝胶的结构和性能。Zou 等对比了超临界二氧化碳干燥和冷冻干燥两种方式制备的淀粉基气凝胶,结果发现冷冻干燥的气凝胶具有更低的密度和比表面积,研究认为在超临界二氧化碳干燥过程中,气凝胶因老化而发生了结构上的改变[13]。

3 展 望

干制作为淀粉原料及其制品加工制造过程的重要加工环节,不仅便于制品保藏和后续加工,还能影响淀粉的加工特性及制品的品质。在当前绿色低碳、节能减排的大背景下,为了更好地进行淀粉原料及制品的干制加工,后续研究建议从以下方面深入:1)传统干制工艺挖掘与创新传承。阴干、晒干、风干等传统干制工艺,在名优特产品的制作中发挥了重要作用,但这类工艺生产周期长,对气象条件依赖度高,产品品质不稳定,因此需要对干制与品质形成规律进行深入研究,用现代科学解析传统干制工艺原理,揭示关联机制,建立新工艺、新方法;2)干制新技术、新工艺对淀粉原料及制品的影响机制研究;3)通过工艺再造、关键单元替换、新设备应用等技术手段,推动干制加工工艺革新,为人们提供更加优质的淀粉加工原料及制品。

参考文献:

[1] 武亮,张影全,王振华,等. 挂面干燥工艺过程研究进展及展望[J]. 中国粮油学报,2017,32(7):133-140.

[2] XIANG Z,YE F,ZHOU Y,et al. Performance and mechanism of an innovative humidity-controlled hot-air drying method for

concentrated starch gels:a case of sweet potato starch noodles[J]. **Food Chemistry**,2018,269:193-201.

[3] YU X,WANG Z,ZHANG Y,et al. Study on the water state and distribution of Chinese dried noodles during the drying process [J]. **Journal of Food Engineering**,2018,233:81-87.

[4] HAROS M,TOLABA M P,SUÁREZ C. Influence of corn drying on its quality for the wet-milling process[J]. **Journal of Food Engineering**,2003,60(2):177-184.

[5] MASATO O,KENTARO M,TATSURO M,et al. Effects of drying temperature on the properties of starch in pasta[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2021,145:1-6.

[6] RAMOS A H,ROCKENBACH B A,FERREIRA C D,et al. Characteristics of flour and starch isolated from red rice subjected to different drying conditions[J]. **Starch – Stärke**,2019,71(7/8):1-8.

[7] MESTRES C,ROUAU X. Influence of natural fermentation and drying conditions on the physicochemical characteristics of cassava starch[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,1997,74(2):147-155.

[8] 杨金玲,张娟,丁锡强. 龙口粉丝的晾晒与气象条件的关系研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(9):5357-5358.

[9] COLLADO L,MABESA L,OATES C,et al. Bihon-type noodles from heat-moisture-treated sweet potato starch[J]. **Journal of Food Science**,2010,66(4):604-609.

[10] LUO Y,LIU Q,LIU J,et al. Effect of starch multi-scale structure alteration on japonica rice flour functionality under infrared radiation drying and storage[J]. **LWT– Food Science and Technology**,2021,143:1-9.

[11] SANTOS T P R,FRANCO C M L,MISCHAN M M,et al. Improvement in spray-drying technology for preparation of pregelatinized cassava starch[J]. **Food Science and Technology**,2019,39:939-946.

[12] YUN P,DEVAHASTIN S,CHIEWCHAN N. Physical properties,microstructure and digestion behavior of amylose-lipid powder complexes prepared using conventional and spray-drying based methods[J]. **Food Bioscience**,2020,37:1-11.

[13] ZOU F,BUDTOVA T. Tailoring the morphology and properties of starch aerogels and cryogels via starch source and process parameter[J]. **Carbohydrate Polymers**,2021,255:1-9.

[14] DONLAO N,MATSUSHITA Y,OGAWA Y. Influence of postharvest drying conditions on resistant starch content and quality of non-waxy long-grain rice(*Oryza sativa* L.)[J]. **Drying Technology**,2018,36(8):952-964.

[15] MALDANER V,CORADI P C,NUNES M T,et al. Effects of intermittent drying on physicochemical and morphological quality of rice and endosperm of milled brown rice[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2021,152:1-13.

[16] DASILVA T N,RAMOS A H,FERREIRA C D,et al. Effects of drying temperature and genotype on morphology and technological,thermal,and pasting properties of corn starch[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,165:354-364.

[17] MALUMBA P,MASSAUX C,DEROANNE C,et al. Influence of drying temperature on functional properties of wet-milled starch granules[J]. **Carbohydrate Polymers**,2009,75(2):299-306.

[18] ODUNMBAKU L A,SOBOWALE S S,ADENEKAN M K,et al. Influence of steeping duration,drying temperature,and duration on the chemical composition of sorghum starch[J]. **Food Science and Nutrition**,2018,6(2):348-355.

[19] DACRUZ D B,DASILVA W S V,DOSSANTOS I P,et al. Structural and technological characteristics of starch isolated from sorghum as a function of drying temperature and storage time[J]. **Carbohydrate Polymers**,2015,133:46-51.

[20] DUAN X,HAN H,DENG R,et al. Drying treatments on Chinese yam (*Dioscorea* spp.) prior to wet milling influence starch molecular structures and physicochemical properties[J]. **Food Hydrocolloids**,2020,102:1-9.

[21] LIU X X,LIU H M,FAN L Y,et al. Effect of various drying pretreatments on the structural and functional properties of starch isolated from Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thumb.)[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,153:1299-1309.

[22] ZHAO J,ZHANG Y,WU Y,et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starch from naturally air-dried chestnut [J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2018,117:1074-1080.

[23] WANG Y,ZHAO J,WU Y,et al. Processing of air-dried chestnut and physicochemical properties of its starch with low

digestibility[J]. **Food Hydrocolloids**,2020,108:1-7.

[24] KHOOZANI A A,BEKHIT A E D A,BIRCH J. Effects of different drying conditions on the starch content,thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2019,130:938-946.

[25] TRIBESS T B,HERNÁNDEZ-URIBE J P,MÉNDEZ-MONTEALVO M G C,et al. Thermal properties and resistant starch content of green banana flour(*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2009,42(5):1022-1025.

[26] SCARIOT M A,KARLINSKI L,DIONELLO R G,et al. Effect of drying air temperature and storage on industrial and chemical quality of rice grains[J]. **Journal of Stored Products Research**,2020,89:1-6.

[27] 成军虎,周显青,张玉荣,等. 干燥玉米品质特性与淀粉得率相关性分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2010,31(4):37-42.

[28] ZIEGLER V,DASILVATIMM N,FERREIRA C D,et al. Effects of drying temperature of red popcorn grains on the morphology,technological,and digestibility properties of starch[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,145:568-574.

[29] HE R,SHANG W,PAN Y,et al. Effect of drying treatment on the structural characterizations and physicochemical properties of starch from canistel(*Lucuma nervosa* A. DC)[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2021,167:539-546.

[30] SU C,SALEH A S M,ZHANG B,et al. Effects of germination followed by hot air and infrared drying on properties of naked barley flour and starch[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,165:2060-2070.

[31] GOÑI I,GARCIA-ALONSO A,SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. **Nutrition Research**,1997,17(3):427-437.

[32] YANG Z,ZHANG Y,WU Y,et al. The role of drying methods in determining the *in vitro* digestibility of starch in whole chestnut flour[J]. **LWT– Food Science and Technology**,2022,153:1-6.

[33] 兰冬梅,林晓岚,许平,等. 响应面法优化微波 - 热风干燥制备锥栗抗性淀粉工艺[J]. 贵州农业科学,2015,43(8):232-236.

[34] 兰冬梅,林晓岚,颜谊颖,等. 微波联合干燥制备锥栗抗性淀粉[J]. 食品与发酵工业,2015,41(5):144-149.

[35] 杜冰,程燕锋,杨公明. 不同干燥工艺对香蕉抗性淀粉的影响[J]. 食品科学,2009(12):31-34.

[36] KARIM A A,TIE A P L,MANAN D M A,et al. Starch from the sago (*Metroxylon sagu*) palm tree-properties,prospects,and challenges as a new industrial source for food and other uses[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2008,7(3):215-228.

[37] LI X,YUE X,HUANG Q,et al. Effects of wet-media milling on multi-scale structures and *in vitro* digestion of tapioca starch and the structure-digestion relationship[J]. **Carbohydrate Polymers**,2022,284:1-13.

[38] 唐小闲,段振华,刘艳,等. 马蹄湿淀粉微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. 食品研究与开发,2017,38(5):15-21.

[39] 李广超,尚小标,张富程,等. 微波干燥玉米淀粉的动态吸波性能分析[J].化学工程,2021,49(10):48-53.

[40] 唐小闲,汤泉,段振华,等.不同干燥方式对莲藕淀粉品质特性的影响[J].食品工业科技,2019,40(6):26-30.

[41] 张玉荣,侯文珊,高佳敏. 湿法制粉工艺对糯米粉淀粉损伤及糊化特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2018,39(1):26-32.

[42] AVIARA N A,IGBEKA J C,NWOKOCHA L M. Effect of drying temperature on physicochemical properties of cassava starch [J]. **International Agrophysics**,2010,24(3):219-225.

[43] ALVARADO P M,GROSMAIRE L,DUFOUR D,et al. Combined effect of fermentation,sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch[J]. **Carbohydrate Polymers**,2013,98(1):1137-1146.

[44] MARCON M J A,KURTZ D J,RAGUZZONI J C,et al. Expansion properties of sour cassava starch (*polvilho azedo*):variables related to its practical application in bakery[J]. **Starch–Stärke**,2009,61(12):716-726.

[45] QI Q,HONG Y,ZHANG Y,et al. Combinatorial effect of fermentation and drying on the relationship between the structure and expansion properties of tapioca starch and potato starch[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,145:

965-973.

[46] DÍAZ A,DINI C,VIÑA S Z,et al. Fermentation and drying effects on bread-making potential of sour cassava and ahipa starches [J]. **Food Research International**,2019,116:620-627.

[47] VATANASUCHART N,NAIVIKUL O,CHAROENREIN S,et al. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion[J]. **Carbohydrate Polymers**,2005,61(1):80-87.

[48] FU Z,WANG L,LI D,et al. Effects of partial gelatinization on structure and thermal properties of corn starch after spray drying [J]. **Carbohydrate Polymers**,2012,88(4):1319-1325.

[49] DOSSANTOS T P R,FRANCO C M L,LEONEL M. Gelatinized sweet potato starches obtained at different preheating temperatures in a spray dryer[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,149:1339-1346.

[50] HE X,XIA W,CHEN R,et al. A new pre-gelatinized starch preparing by gelatinization and spray drying of rice starch with hydrocolloids[J]. **Carbohydrate Polymers**,2020,229:1-8.

[51] 谢岩黎,颜明霞,郝振宇. 干燥温度对马铃薯淀粉粉丝晶体特性和复水性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2016,37(1):55-59.

[52] MEARS L L E,DRAPER E R,CASTILLA A M,et al. Drying affects the fiber network in low molecular weight hydrogels[J]. **Biomacromolecules**,2017,18(11):3531-3540.

[53] BADER H G,GÖRITZ D. Investigations on high amylose corn starch films. Part 1:wide angle X-ray scattering (WAXS)[J]. **Starch–Stärke**,1994,46(6):229-232.

[54] RINDLAVA A,HULLEMAN S H D,GATENHOLMA P. Formation of starch films with varying crystallinity[J]. **Carbohydrate Polymers**,1997,34(1/2):25-30.

[55] ZHENG Q,TIAN Y,YE F,et al. Fabrication and application of starch-based aerogel:technical strategies[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2020,99:608-620.

科 技 信 息

欧盟拟修订用于生产酒类的农业来源乙醇检测方法

2022 年 11 月 8 日,欧盟委员会网站发布 Ref.Ares(2022)7695930 号提案,拟修订用于生产烈酒、芳香型葡萄酒及其衍生酒精饮料的农业来源乙醇的检测方法。修订的主要内容为:1)修订农业来源乙醇中糠醛和挥发性物质的检测方法;2)新增农业来源乙醇中 ^{14}C 的检测方法,具体为液体闪烁计数法。

[信息来源]海关总署.欧盟拟修订用于生产酒类的农业来源乙醇检测方法[EB/OL]. (2022-11-21).http://www.tbt.org.cn/warningDetail.html?id=D7DOkjJuuByogy1AP4uUkR5mO3haEp1u74w4Fdv.