

玉米多孔淀粉的制备与理化性质研究

王熙函¹, 陈东晓¹, 吴佳悦¹, 卫馨悦¹, 曲迎辉¹, 黄正梅², 赵化冰^{1,3*}

¹天津科技大学生物工程学院, 天津

²天科本真(天津)生物科技有限公司, 天津

³天津科技大学工业发酵微生物教育部重点实验室, 天津

收稿日期: 2024年8月12日; 录用日期: 2024年9月12日; 发布日期: 2024年9月23日

摘要

使用玉米淀粉作为原料, 通过复合酶法成功制备了具有优良特性的多孔淀粉, 并对其理化性质进行了详细分析。研究结果显示, 在最佳的酶解条件下, 酶配比为1:3 (g/g)、酶用量为3%、底物浓度为25%、酶解时间为8 h、酶解温度为45°C、以及pH值为5.5时得到的多孔淀粉展现出了较高的吸油率(189.56%)、较大的比容(2.13 cm³/g)、合适的溶解率(13.17%)以及显著的膨胀力(3.63 g/g), 这些指标均明显优于原始淀粉。扫描电子显微镜(SEM)的观察进一步证实了多孔淀粉颗粒的完整性和表面的蜂窝状微孔结构, 孔径和深度均处于理想状态, 所制备的多孔淀粉具有广泛的潜在应用价值。

关键词

玉米, 复合酶法, 多孔淀粉, 理化性质

Preparation and Physicochemical Properties of Corn Porous Starch

Xihan Wang¹, Dongxiao Chen¹, Jiayue Wu¹, Xinyue Wei¹, Yinghui Qu¹, Zhengmei Huang², Huabing Zhao^{1,3*}

¹College of Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

²Tianke Benzhen (Tianjin) Biotechnology Co., Ltd., Tianjin

³Key Laboratory of Industrial Fermentation Microbiology, Ministry of Education, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

Received: Aug. 12th, 2024; accepted: Sep. 12th, 2024; published: Sep. 23rd, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王熙函, 陈东晓, 吴佳悦, 卫馨悦, 曲迎辉, 黄正梅, 赵化冰. 玉米多孔淀粉的制备与理化性质研究[J]. 生物过程, 2024, 14(3): 156-165. DOI: 10.12677/bp.2024.143020

Abstract

Using corn starch as raw material, porous starch with excellent properties was successfully prepared by compound enzymatic method, and its physicochemical properties were analyzed in detail. The results showed that under the optimal enzymatic hydrolysis conditions, the porous starch obtained at the enzyme ratio of 1:3 (g/g), the enzyme dosage of 3%, the substrate concentration of 25%, the enzymatic hydrolysis time of 8 h, the enzymatic hydrolysis temperature of 45°C, and the pH value of 5.5 showed higher oil absorption rate (189.56%), larger specific volume (2.13 cm³/g), suitable solubility (13.17%) and significant swelling force (3.63 g/g), which were significantly better than those of the original starch. The observation of scanning electron microscopy (SEM) further confirmed the integrity of porous starch granules, the honeycomb microporous structure on the surface, and the pore size and depth were in an ideal state, and the prepared porous starch has a wide range of potential application value.

Keywords

Corn, Complex Enzymatic Method, Porous Starch, Physicochemical Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

淀粉因其丰富的可用性、可再生性和相对较低的成本而成为最广泛使用的天然生物聚合物之一。然而，淀粉作为吸附剂的应用受到其天然低表面积和孔容积的限制[1]。目前已制备出多种具有高比表面积和孔容积的变性淀粉以克服这些缺点。多孔淀粉就是近年来备受关注的—种新型变性淀粉[2] [3]，因其吸附性能卓越而被广泛应用于食品、医药、化工、化妆品和农业等各个领域[4]，在食品行业，多孔淀粉可用于增加食品的口感和稳定性；在医药领域，可以作为药物载体，提高药物的释放效率；在化工产业，多孔淀粉可用于吸附有害物质；在化妆品行业，它被用作天然吸油剂，提升产品使用舒适度；在农业领域，多孔淀粉可作为肥料和农药的缓释载体，提高农药的使用效率并减少环境污染。

多孔淀粉的颗粒表面具有丰富的、延伸至中心的微米级孔隙，孔隙直径—般约 1 μm，总体积约为淀粉的一半。淀粉表面由于存在大量羟基而具有较强亲水性，以疏水性强的药物紫杉醇为例，将多孔淀粉作为药物载体，其载药的溶解度明显高于原药，在胃肠液的累计释放量也相应增加了一倍[5]。多孔淀粉具有较大的比表面积，对于活性物质的理想的吸附很重要，特别是易被氧化的物质(如维生素 A、维生素 C 以及受控药物等)，能够在多孔淀粉中得到更好的保护，提高其稳定性[6]。多孔淀粉可以通过物理、化学、生物酶法以及两种或多种方法同时使用的复合法获得。其中，生物酶法分为—单—酶法和复合酶法，在复合酶处理中，不同类型的酶结合使用会产生协同效应，从而提高孔隙形成的有效性[7]。相比于物理化学改性，酶法改性具有许多优点，包括副产物更少、产率更高，此外还可以更好地控制反应过程以获得特定性能[4]。超声波辅助酶解法是目前生产多孔淀粉的常规方法[2] [8]。然而，超声波设备复杂，有噪音，耗能高，而且高强度超声波会破坏酶的微观结构并使其失活[9]。

常用的多孔性淀粉制备材料包括玉米淀粉、马铃薯淀粉、木薯淀粉、大麦淀粉以及小麦淀粉等[10]，其中玉米淀粉的表面具有天然微孔结构，有利于酶的催化作用[11]，本研究提出了一种以玉米淀粉为原始

材料, 结合 α -淀粉酶与糖化酶的复合酶法, 简便高效地制备多孔淀粉。通过对制备工艺的优化, 深入分析了其结构及理化特性, 并与原始淀粉进行了对比, 为玉米淀粉的开发与应用提供了技术依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料与试剂

玉米淀粉, 上海源叶生物科技有限公司; 糖化酶, 上海源叶生物科技有限公司; α -淀粉酶, 上海麦克林生化科技有限公司; 冰乙酸, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 无水乙酸钠, 生工生物工程(上海)股份有限公司; 95%乙醇, 天津市江天化工技术有限公司; 金龙鱼压榨玉米油, 嘉里粮油(营口)有限公司。

2.2. 仪器与设备

FE20 实验室 pH 计, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; ME204 电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; SYC-A (回旋)水浴恒温(调速)振荡器, 上海新苗医疗器械制造有限公司; 3-18K 高速离心机, 德国 SIGMA 实验室离心机公司; WH240 PLUS 数显集热式磁力搅拌器, 德国 WIGGENHAUSER 集团; ZXFD-B5250 鼓风干燥箱, 上海智城分析仪器制造有限公司; JSM-IT300LV 扫描电子显微镜, 日本电子公司。

2.3. 试验方法

2.3.1. 多孔淀粉的制备

称取一定量的原玉米淀粉, 加入到一定 pH 值的 0.1 M 乙酸钠缓冲液中, 制备淀粉悬浮液。将悬浮液在一定温度的水浴恒温振荡器中预热静置 10 min。首先准确称取 α -淀粉酶和糖化酶, 依照特定质量比混合, 使用缓冲液配制所需浓度的酶液并将配制好的酶液完整地加入到淀粉悬浮液中后立即开始计时。在 200 r/min 恒定条件下持续搅拌一定时间, 搅拌完毕后, 迅速加入占体系总体积 15% 的 95% 乙醇使酶失活以终止反应。然后以 4000 r/min 速率离心 10 min, 并水洗两次, 每次水洗后均进行离心操作。将淀粉沉积物转移到培养皿中, 在恒温干燥箱中以 40°C 条件干燥至恒重, 使用研钵将干燥后的淀粉样品磨碎并过 100 目筛[12] [13]。

2.3.2. 单因素试验

在本研究中, 我们调整 2.3.1 中一个变量(酶配比、底物浓度、pH 值、温度、酶用量或酶解时间)并设定了七个不同的水平。在固定其他所有实验条件的基础上, 选取吸油率作为评价指标来探究单一因素对实验结果的影响。

2.3.3. 正交试验

根据单因素试验的结果, 本研究采用了 L18 (3⁶) 的正交试验设计方法。具体的因素与水平详见表 1。

Table 1. Orthogonal experimental design

表 1. 正交试验设计表

水平	因素					
	(A)酶配比/(g/g)	(B)酶用量/%	(C)底物浓度/%	(D)时间/h	(E) pH	(F)温度/°C
1	1:3	2	20	6	5.0	45
2	1:4	3	25	8	5.5	50
3	1:5	4	30	10	6.0	55

2.4. 分析方法

2.4.1. 吸油率的测定

向干燥的离心管中加入 0.5 g 淀粉和 8 mL 玉米油, 室温下磁力搅拌 5 min, 并静置 30 min 使淀粉充分吸收油分。然后将混合物在 4000 r/min 的条件下离心 10 min, 去除上层油直至无多余油滴落下[14][15]。淀粉样品的吸油率(AC)按公式(1)计算得到:

$$AC(\%) = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W ——含油淀粉的质量, g; W_0 ——干淀粉的质量, g。

2.4.2. 比容积的测定

在 10 mL 量筒中置入准确称取的 2.00 g 淀粉, 轻轻敲击调整量筒确保淀粉在其中均匀分散并保持表面水平。记录下此时的体积读数, 并据此计算每克淀粉所占的体积, 以此得出淀粉的比容[16]。

2.4.3. 溶解率和膨胀力的测定

首先制备 3% 浓度的淀粉悬液并在 60℃ 条件下搅拌 30 min, 搅拌完成后以 4000 r/min 的速度离心 10 min。随后将上清液转移至 60℃ 的烘箱中, 烘干直至恒重[12][17]。依据公式(2)和公式(3)分别计算淀粉的溶解率(S)和膨胀力(B)。

$$S = \frac{A}{W} \times 100\% \quad (2)$$

$$B = \frac{P}{W(1-S)} \quad (3)$$

式中: W ——淀粉样品干重, g; A ——上清液烘干后质量, g; P ——离心后沉淀质量, g。

2.4.4. 扫描电子显微镜(SEM)观察淀粉结构

首先在双面胶上取微量淀粉样品均匀涂抹后用洗耳球轻轻吹去多余样品, 转移至镀金仪中进行 60 s 的镀金处理。经处理后将样品移至电子显微镜下进行观察并拍照记录。

3. 结果与分析

3.1. 单因素试验结果

3.1.1. 酶比对吸油率的影响

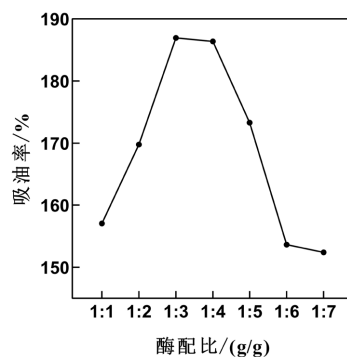


Figure 1. Effect of enzyme ratio on oil absorption
图 1. 酶比对吸油率的影响

酶配比选择 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5、1:6、1:7 (g/g)。其他参数选择为：酶用量 2%，底物浓度 20%，酶解时间 8 h，pH 值 5.5，温度 50℃。如图 1 所示， α -淀粉酶与糖化酶的配比对多孔淀粉吸油率产生影响。随着比值的降低，吸油率初期呈上升趋势，随后开始下降，当二者的比值为 1:3 时吸油率达到峰值。 α -淀粉酶仅水解淀粉的 α -1,4-糖苷键，产生大量寡糖，进而抑制 α -淀粉酶进一步水解。而糖化酶通过水解 α -1,4-和 α -1,6-糖苷键，能够将潜在抑制性寡糖转化为葡萄糖，这种协同作用大大增强了淀粉水解[15]。因此，当酶用量一定时，糖化酶比值大，淀粉水解就快；糖化酶含量过低成孔不充分；含量过高，相应的 α -淀粉酶含量过低，成孔太少，只有在二者比例最佳时多孔淀粉的成孔效果最好、吸油率最高。因此该反应体系理想酶配比为 1:3。

3.1.2. 酶用量对吸油率的影响

酶用量选择 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%。其他参数选择为：酶配比 1:5 (g/g)，底物浓度 20%，酶解时间 8 h，pH 值 5.5，温度 50℃。图 2 所示，酶用量对多孔淀粉吸油率产生影响。随酶用量的增加，多孔淀粉吸油率先上升至最大值后逐渐下降，其中在酶添加量为 3.0% 时吸油率达到峰值。这一现象表明，较低的酶添加量导致酶与淀粉颗粒接触不足，阻碍了淀粉的水解。而较高的酶用量使淀粉颗粒过度水解，破坏其多孔结构，这些被过度水解的淀粉颗粒转变为颗粒更小的结构或葡萄糖，从而降低了吸油率。

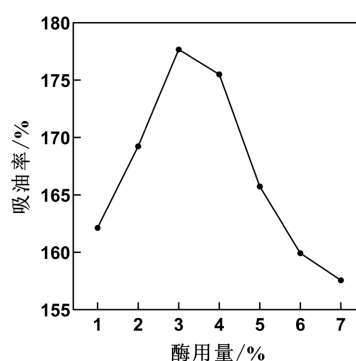


Figure 2. Effect of enzyme dosage on oil absorption

图 2. 酶用量对吸油率的影响

3.1.3. 底物浓度对吸油率的影响

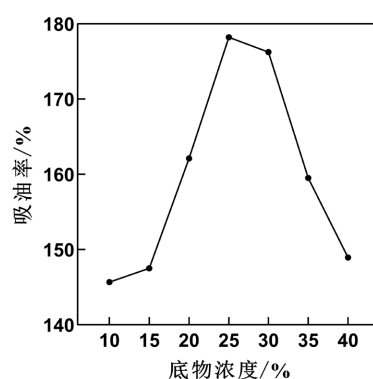


Figure 3. Effect of substrate concentration on oil absorption

图 3. 底物浓度对吸油率的影响

底物浓度选择 10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%。其他参数选择为：酶配比 1:5 (g/g)，酶用

量 2%，酶解时间 8 h，pH 值 5.5，温度 50℃。由图 3 可知：淀粉的吸油率随着底物浓度的增加先上升后下降，在底物浓度为 25% 时，吸油率最高。可能是因为当底物浓度过低时，酶与淀粉发生充分反应，导致淀粉被过度水解并破坏其多孔结构，结果使吸油率降低。相反，当底物浓度过高时，混悬液中酶与淀粉不能形成均匀分散的体系，从而妨碍了充分接触和水解，部分淀粉甚至未被作用，同样导致吸油率下降。

3.1.4. 酶解时间对吸油率的影响

酶解时间选择 2 h、4 h、6 h、8 h、10 h、12 h、14 h。其他参数选择为：酶配比 1:5 (g/g)，酶用量 2%，底物浓度 20%，pH 值 5.5，温度 50℃。如图 4 所示，淀粉的吸油率随酶解时间延长先增加后减少，达到峰值时的酶解时间为 8 小时。在较短的酶解时间内，由于酶与淀粉的反应不充分，淀粉颗粒的孔径及深度不足，部分颗粒甚至未被水解。而在较长的酶解时间中，原先具有良好孔隙的淀粉颗粒会崩解，分解为更小的颗粒或完全转化为葡萄糖[18]，从而导致吸油率的降低。

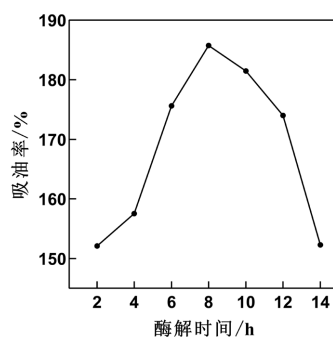


Figure 4. Effect of enzymatic hydrolysis time on oil absorption
图 4. 酶解时间对吸油率的影响

3.1.5. pH 值对吸油率的影响

pH 值选择 4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0。其他参数选择为：酶配比 1:5 (g/g)，酶用量 2%，底物浓度 20%，酶解时间 8 h，温度 50℃。如图 5 所示，多孔淀粉的吸附性能随 pH 值的变化呈现先增加后减少的趋势，并在 pH 值达到 5.5 时吸油率达到最大，此时吸附效果最佳。当 pH 值 ≤ 5.5 时，随着 pH 值的升高，复合酶的活性逐渐增强，从而使协同水解作用加强，淀粉的吸附性能得到提高；当 pH 值 ≥ 6.0 后，复合酶的活性降低，限制了淀粉的酶解过程，成孔减少，淀粉的吸附性能下降。因此，本反应体系的最佳 pH 值为 5.5。

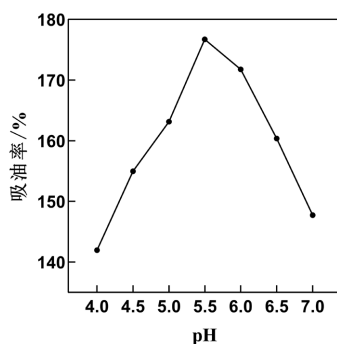


Figure 5. Effect of pH on oil absorption
图 5. pH 对吸油率的影响

3.1.6. 酶解温度对吸油率的影响

酶解温度选择 30、35、40、45、50、55、60℃。其他参数选择为：酶用量 2%，底物浓度 20%，酶解时间 8 h，pH 值 5.5。如图 6 所示，淀粉的吸油率随温度升高先增加后减少，且在 45℃ 时达到最大值。当温度 $\leq 45^\circ\text{C}$ 时，随着温度升高， α -淀粉酶和糖化酶的活性不断增强，且淀粉颗粒吸水膨胀，颗粒强度下降，有利于淀粉酶的水解。当温度继续升高时，酶的活性会逐渐降低，同时淀粉更易于糊化，进而导致成孔效果变差，降低吸油率。因此，在 45℃ 条件下酶促反应效率最高，同时淀粉的吸油率达到顶峰。

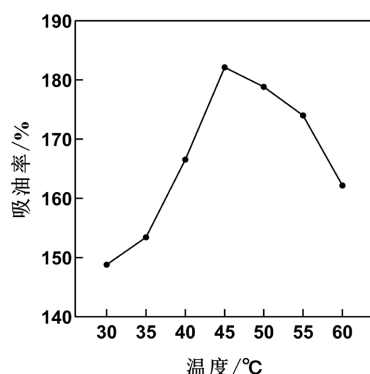


Figure 6. Effect of enzymatic hydrolysis temperature on oil absorption
图 6. 酶解温度对吸油率的影响

3.2. 正交试验结果

正交试验的结果如表 2 所示。根据表中极差分析，影响多孔淀粉吸油率的因素按重要程度排序为：酶配比(A) > 酶用量(B) > 温度(F) > 时间(D) > 底物浓度(C) > pH 值(E)。其中，酶比对多孔淀粉成孔效果的影响最为显著。最优工艺参数组合为 α -淀粉酶与糖化酶质量比 1:3，酶用量 3%，底物浓度 25% (w/v)，反应温度 45℃，反应时间 8 h，体系 pH 值 5.5。在此条件下，多孔淀粉的吸油率达到最大值，为 189.56%。

Table 2. Orthogonal experimental design and results

表 2. 正交试验设计及结果表

实验号	A	B	C	D	E	F	吸油率/%
1	1	1	1	1	1	1	169.84
2	1	2	2	2	2	2	184.85
3	1	3	3	3	3	3	163.88
4	2	1	1	2	2	3	165.46
5	2	2	2	3	3	1	179.82
6	2	3	3	1	1	2	151.63
7	3	1	2	1	3	2	164.81
8	3	2	3	2	1	3	178.73
9	3	3	1	3	2	1	182.60
10	1	1	3	3	2	2	178.59
11	1	2	1	1	3	3	180.03

续表

12	1	3	2	2	1	1	187.00
13	2	1	2	3	1	3	169.22
14	2	2	3	1	2	1	173.80
15	2	3	1	2	3	2	162.44
16	3	1	3	2	3	1	158.57
17	3	2	1	3	1	2	160.49
18	3	3	2	1	2	3	156.19
k1	177.365	167.748	170.143	166.050	169.485	175.272	
k2	167.062	176.287	173.648	172.842	173.582	167.135	
k3	166.898	167.290	167.533	172.433	168.258	168.918	
极差 R	10.467	8.997	6.115	6.792	5.324	8.137	

3.3. 玉米原淀粉与多孔淀粉的性质比较

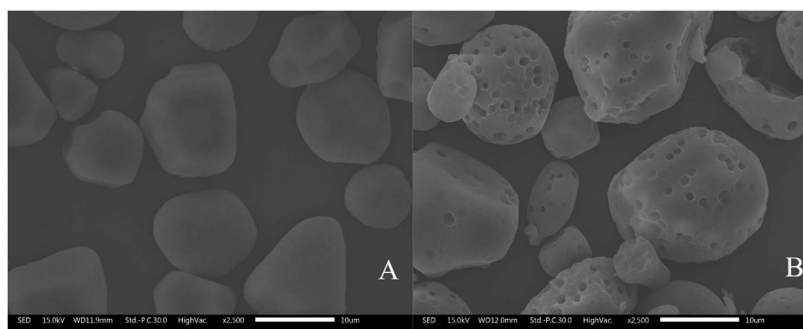
如表 3 显示, 多孔淀粉的吸油率较原始淀粉提升了 77.14%。这一结果表明, 淀粉表面吸附与微孔结构吸附的综合作用反映出多孔淀粉的吸油率性能。因此, 吸油率通常被用作评估淀粉多孔性的指标[19]-[21]。原淀粉只是表面吸附, 而多孔淀粉颗粒呈蜂窝状, 孔的数目较多且密度均一, 吸油率较原淀粉大大提高。多孔淀粉的比容积较原淀粉提高了 36.80%, 由于多孔淀粉内部形成空腔, 同等质量的情况下, 其颗粒数量增多且体积扩大, 从而导致比容积的提升。相较于原始淀粉, 多孔淀粉的膨胀力和溶解率分别增加了 64.37%和 42.47 倍。这种变化是由于多孔结构使得淀粉颗粒的结构强度减弱, 水束层破坏, 从而使水分子更易与淀粉分子中的氢键结合。此外, 温度的升高会减弱氢键的强度, 进一步促进淀粉的溶解和膨胀[16] [22]。

Table 3. Comparison of the properties of raw starch and porous starch

表 3. 原淀粉和多孔淀粉的性质比较

类型	比容积/(cm ³ /g)	溶解率/%	膨胀力/(g/g)	吸油率/%
原淀粉	1.557	0.303	2.206	107.01
多孔淀粉	2.130	13.170	3.626	189.56

3.4. 扫描电子显微镜(SEM)观察淀粉结构



注: A 为原淀粉, B 为最佳条件下制备的多孔淀粉。

Figure 7. Porous starch SEM scan results

图 7. SEM 扫描结果

如图 7 所示, 原始玉米淀粉颗粒保持其完整性, 通常呈近似圆形的结构且表面平整。相较而言, 在最优工艺条件下所得多孔淀粉颗粒展示出优良的完整性, 其表面布满了均匀且密集的小孔。将淀粉样品使用孔径分析仪在 77.3K 下测定孔径分布, 结果显示多孔淀粉的平均孔径为 9.056 nm, 这些孔洞的尺寸和深度均为理想状态, 明显提升了成孔效果。此结果表明具有高吸油率和优良成孔效果的玉米多孔淀粉可通过复合酶法有效制备, 从而验证本研究所优化工艺的实用性。

4. 结论

通过正交实验优化了复合酶水解玉米淀粉的工艺条件。最优条件为: α -淀粉酶与糖化酶的质量比为 1:3, 酶用量设定为 3%, 底物浓度 25%, 酶解温度在 45℃ 进行, 持续时间 8 h, 反应体系 pH 值 5.5。基于此条件, 多孔淀粉的吸油率、比容积、溶解率及膨胀力均较原始淀粉有显著提升。扫描电子显微镜分析显示, 多孔淀粉颗粒结构完整, 成孔效果显著。这些结果验证了利用复合酶法制备玉米多孔淀粉的工艺是可行的, 并且能够达到理想的成孔效果。

参考文献

- [1] Doi, S., Clark, J.H., Macquarrie, D.J. and Milkowski, K. (2002) New Materials Based on Renewable Resources: Chemically Modified Expanded Corn Starches as Catalysts for Liquid Phase Organic Reactions. *Chemical Communications*, **2002**, 2632-2633. <https://doi.org/10.1039/b207780a>
- [2] Qian, J., Chen, X., Ying, X. and Lv, B. (2010) Optimisation of Porous Starch Preparation by Ultrasonic Pretreatment Followed by Enzymatic Hydrolysis. *International Journal of Food Science & Technology*, **46**, 179-185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02469.x>
- [3] Niemann, C. and Whistler, R.L. (1992) Effect of Acid Hydrolysis and Ball Milling on Porous Corn Starch. *Starch—Stärke*, **44**, 409-414. <https://doi.org/10.1002/star.19920441103>
- [4] Dura, A., Błaszczak, W. and Rosell, C.M. (2014) Functionality of Porous Starch Obtained by Amylase or Amyloglucosidase Treatments. *Carbohydrate Polymers*, **101**, 837-845. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.013>
- [5] Zhao, B.B., Gu, Z.B., Zhang, Y.T., et al. (2022) Starch-Based Carriers of Paclitaxel: A Systematic Review of Carriers, Interactions, and Mechanisms. *Carbohydrate Polymers*, **291**, Article ID: 119628.
- [6] Zhao, B., Du, J., Zhang, Y., Gu, Z., Li, Z., Cheng, L., et al. (2022) Polysaccharide-coated Porous Starch-Based Oral Carrier for Paclitaxel: Adsorption and Sustained Release in Colon. *Carbohydrate Polymers*, **291**, Article ID: 119571. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119571>
- [7] Hj. Latip, D.N., Samsudin, H., Utra, U. and Alias, A.K. (2020) Modification Methods toward the Production of Porous Starch: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **61**, 2841-2862. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1789064>
- [8] Wu, Y., Du, X., Ge, H. and Lv, Z. (2011) Preparation of Microporous Starch by Glucoamylase and Ultrasound. *Starch—Stärke*, **63**, 217-225. <https://doi.org/10.1002/star.201000036>
- [9] Isono, Y., Kumagai, T. and Watanabe, T. (1994) Ultrasonic Degradation of Waxy Rice Starch. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, **58**, 1799-1802. <https://doi.org/10.1271/bbb.58.1799>
- [10] Chen, J., Wang, Y., Liu, J. and Xu, X. (2020) Preparation, Characterization, Physicochemical Property and Potential Application of Porous Starch: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **148**, 1169-1181. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.055>
- [11] Fannon, J.E., Gray, J.A., Gunawan, N., et al. (2003) The Channels of Starch Granules. *Food Science and Biotechnology*, **12**, 700-704.
- [12] Han, X., Wen, H., Luo, Y., Yang, J., Xiao, W., Ji, X., et al. (2021) Effects of α -Amylase and Glucoamylase on the Characterization and Function of Maize Porous Starches. *Food Hydrocolloids*, **116**, Article ID: 106661. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106661>
- [13] Benavent-Gil, Y. and Rosell, C.M. (2017) Comparison of Porous Starches Obtained from Different Enzyme Types and Levels. *Carbohydrate Polymers*, **157**, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.047>
- [14] Guo, L., Yuan, Y., Li, J., Tan, C., Janaswamy, S., Lu, L., et al. (2021) Comparison of Functional Properties of Porous Starches Produced with Different Enzyme Combinations. *International Journal of Biological Macromolecules*, **174**, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.165>

-
- [15] Guo, L., Li, J., Gui, Y., Zhu, Y., Yu, B., Tan, C., *et al.* (2020) Porous Starches Modified with Double Enzymes: Structure and Adsorption Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, **164**, 1758-1765.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.323>
- [16] 王彩娇, 赵安琪, 于雷, 等. 高粱多孔淀粉制备工艺的优化及理化性质研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(9): 35-39.
- [17] Keeratiburana, T., Hansen, A.R., Soontaranon, S., Blennow, A. and Tongta, S. (2020) Porous High Amylose Rice Starch Modified by Amyloglucosidase and Maltogenic α -Amylase. *Carbohydrate Polymers*, **230**, Article ID: 115611.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115611>
- [18] 徐忠, 缪铭, 李丽莎. 酶法制备多孔玉米淀粉的影响因素研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(3): 63-68.
- [19] 杨永美, 刘钟栋, 毕礼政, 等. 超声波微波协同组合酶法制备玉米多孔淀粉[J]. 中国食品添加剂, 2012(1): 76-81.
- [20] 施晓丹, 汪少芸. 多孔淀粉的制备与应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 187-195.
- [21] 黄晶晶, 施晓丹, 汪少芸. 豆薯多孔淀粉的制备、理化性质及吸附性能的研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 120-126.
- [22] 许丽娜. 多孔淀粉的制备与性质研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2010.