



蘇州大學

SOOCHOW UNIVERSITY



非常规动物蛋白饲料原料的实践利用 技术和质量评估

- 工业化发酵和酶解技术开发新型功能饲料原料

叶元土

2026

苏州大学基础医学与生物科学学院，江苏省水产动物营养重点实验室
江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号

水产动物功能需要的三个维度

1. 生命起源：海洋活性物质
2. 生物进化：无氧代谢到有氧代谢，抗氧化与免疫防御
3. 水域环境：细胞低钠高钾环境、渗透压调节

全价配合饲料

全营养素、含量及其比例

全功能配合饲料

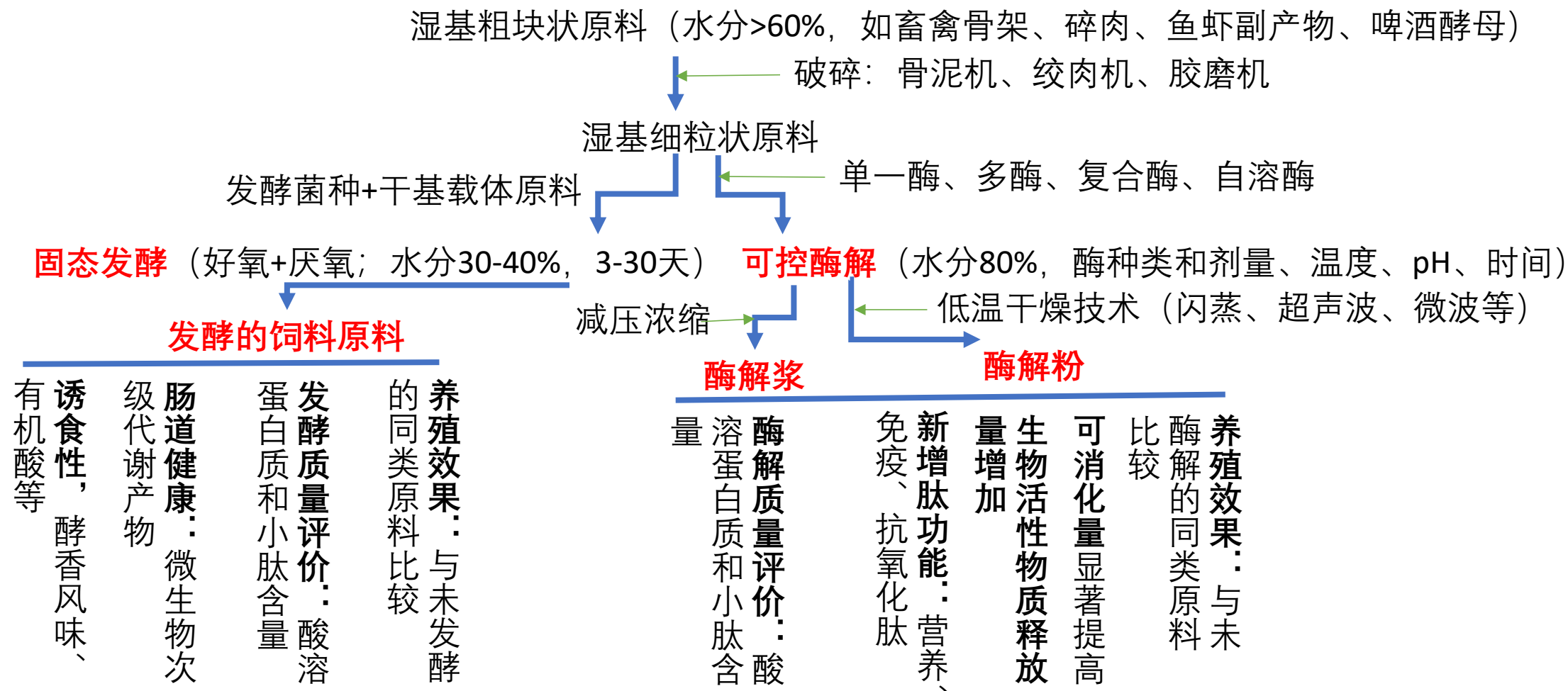
全生物活性物质、含量及其比例

饲料质量与功能的三个维度

1. 生产性能：生长速度和饲料效率
2. 生理健康：整体健康和胃肠道、肝胰脏健康
3. 食用质量：风味、滋味、肌纤维咀嚼感、营养和安全性

水产饲料质量与功能的发展方向与需求

新原料及其开发新技术





蘇州大學

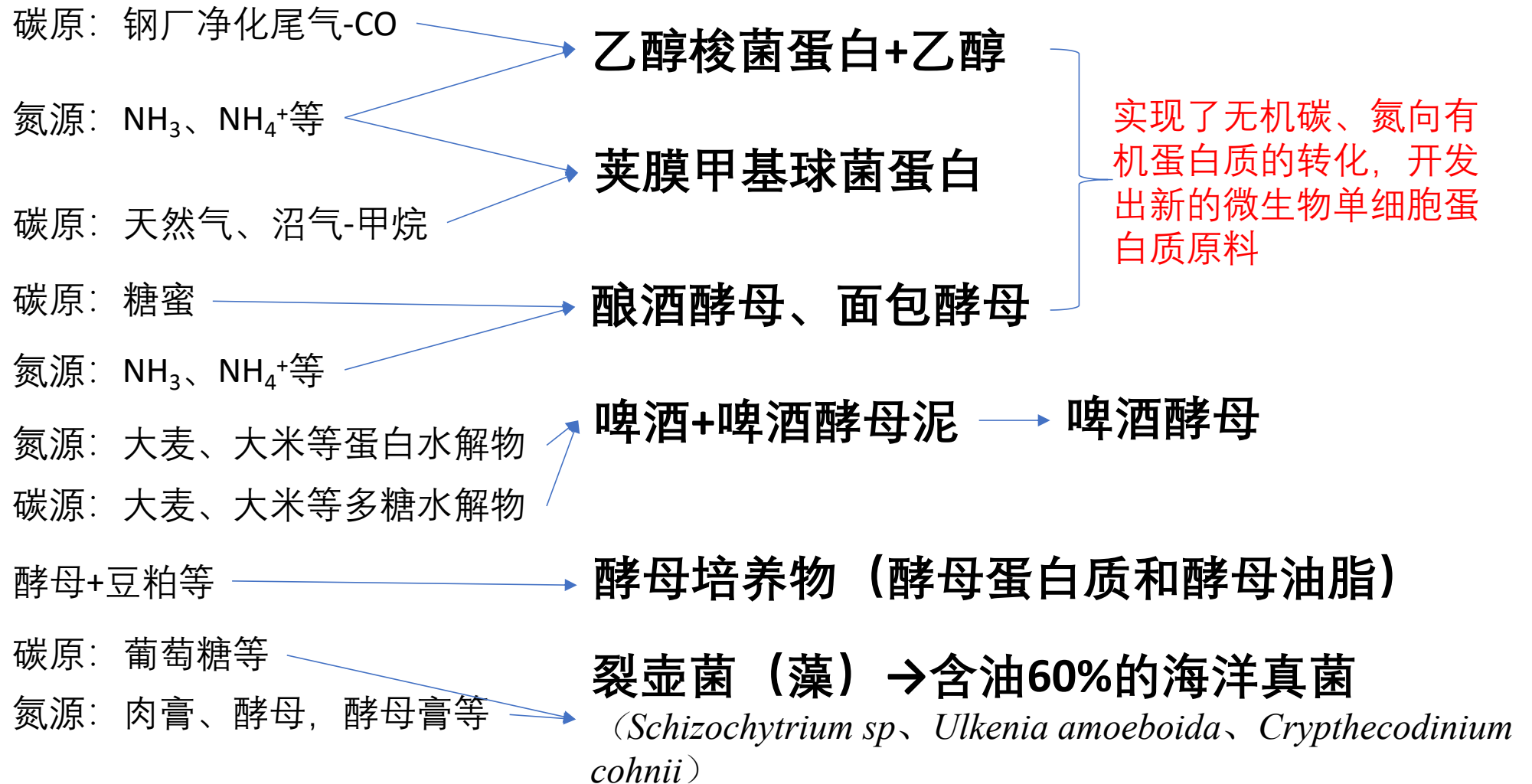
SOOCHOW UNIVERSITY



一、工业化酶解技术、发酵技术及其产品

苏州大学基础医学与生物科学学院，江苏省水产动物营养重点实验室
江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号

工业发酵生产微生物蛋白质、油脂功能性原料



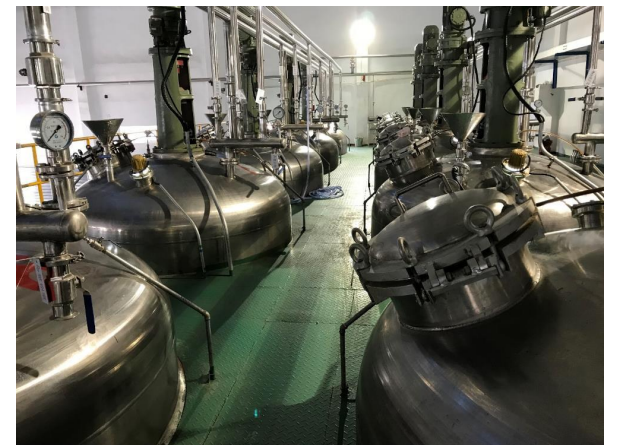
工业化酶解技术生产并应用的酶解产品

- 海洋鱼虾等的酶解产品
 - 酶解鱼溶浆（粉）：原料为鱼溶浆
 - 酶解鱼浆（粉）：原料为全鱼、鱼排
 - 酶解虾浆：原料为海捕小虾
 - 酶解乌贼浆（粉）；以乌贼内脏为原料
- 酶解畜禽产品
 - 酶解鸡（鸭）溶浆：以鸡（鸭）肉粉压榨水为原料
 - 酶解鸡（鸭）浆：以鸡（鸭）架为原料
- 酶解植物蛋白产品
 - 酶解大豆粉：以大豆为原料
 - 玉米肽浆/粉：以玉米浸泡水、玉米蛋白粉为原料
- 酶解海藻产品
 - 酶解海藻提取物：以海藻（浒苔、马尾藻）为原料
 - 酶解海藻浆：以海藻（浒苔、马尾藻）为原料
- 啤酒酵母酶解产品
 - 酶解浆/粉：新鲜的啤酒酵母、发酵生产的酿酒酵母
- 昆虫酶解产品
 - 酶解黑水虻浆：黑水虻幼虫



工业化酶解技术

- 将酶解原理转化为对饲料原料的酶解技术需要考虑几个核心点
 - **酶的选择**与成本（酶解鱼溶浆等加酶的成本：600-800元/吨）
 - 酶解容器与过程控制：酶解液水分约80-85%（脂肪<10%），温度50-55℃，pH值酸性或中性，酶解时间3-4h
 - 反应釜 5-10吨/罐：需要组合为**班产20吨-100吨**规模
 - 过程控制：能源消耗、智能化设备
 - 连续或间断式工艺流程及其设备
 - **水分蒸发的设备与热能消耗**：成品水分40-50%的液态产品；
 - 水分<10%的粉状产品；需要蒸汽供给
 - 环保设备



酶解产品的化学、感官评价和养殖评价

- 饲料原料酶解前后产品质量差异在哪里？或者，酶解与非酶解产品质量差异何在？
 - 感官评价：色泽、气味、口味、物理性状（液态、粉末？）、流动性等
 - 苦味、麻味：苦味肽、麻味肽
 - 化学评价（营养与功能评价）
 - 酶解前后营养组成的变化幅度
 - 酸溶蛋白质含量：酸溶蛋白质（肽） $\geq 75\%$
 - 肽含量
 - 游离氨基酸含量
 - 抗氧化功能效果：体外抗氧化试验如清楚不同自由基能力的 EC_{50} 值、抗氧化能力AO值
 - 抗菌功能评价：体外抑菌试验效果（抑菌谱及其效果）
 - 特殊或特定成分水溶液含量（抗营养因子和有益因子的含量）
- 养殖评价（生物评价）是综合性的、最有效的评价方法

啤酒酵母酶解浆

-中国啤酒酵母总产量及来源

- 年产量估算

- 湿啤酒酵母（含水70%-75%）：约 **120-150万吨**（主要来自啤酒生产副产物）。
- 干啤酒酵母（含水 $\leq 8\%$ ）：约 **25-30万吨**（通过干燥湿酵母获得）。
- 自溶酵母粉/水解物：约 **10-15万吨**（经酶解或发酵处理）。

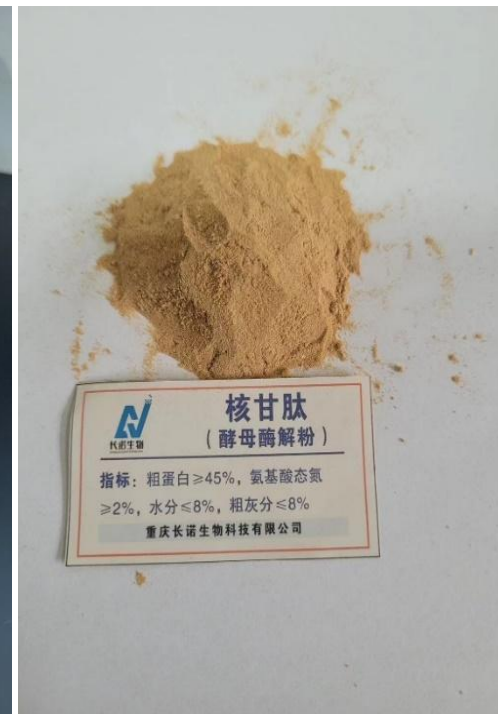
- 来源分布

- 华润雪花、青岛啤酒、燕京啤酒等头部企业贡献**70%**以上产量，其余来自中小型啤酒厂。
- 每生产1万吨啤酒约产生 **100-120吨**湿酵母泥。



HUAWEI Mate X5

XIMAGE
2024/08/12 11:13

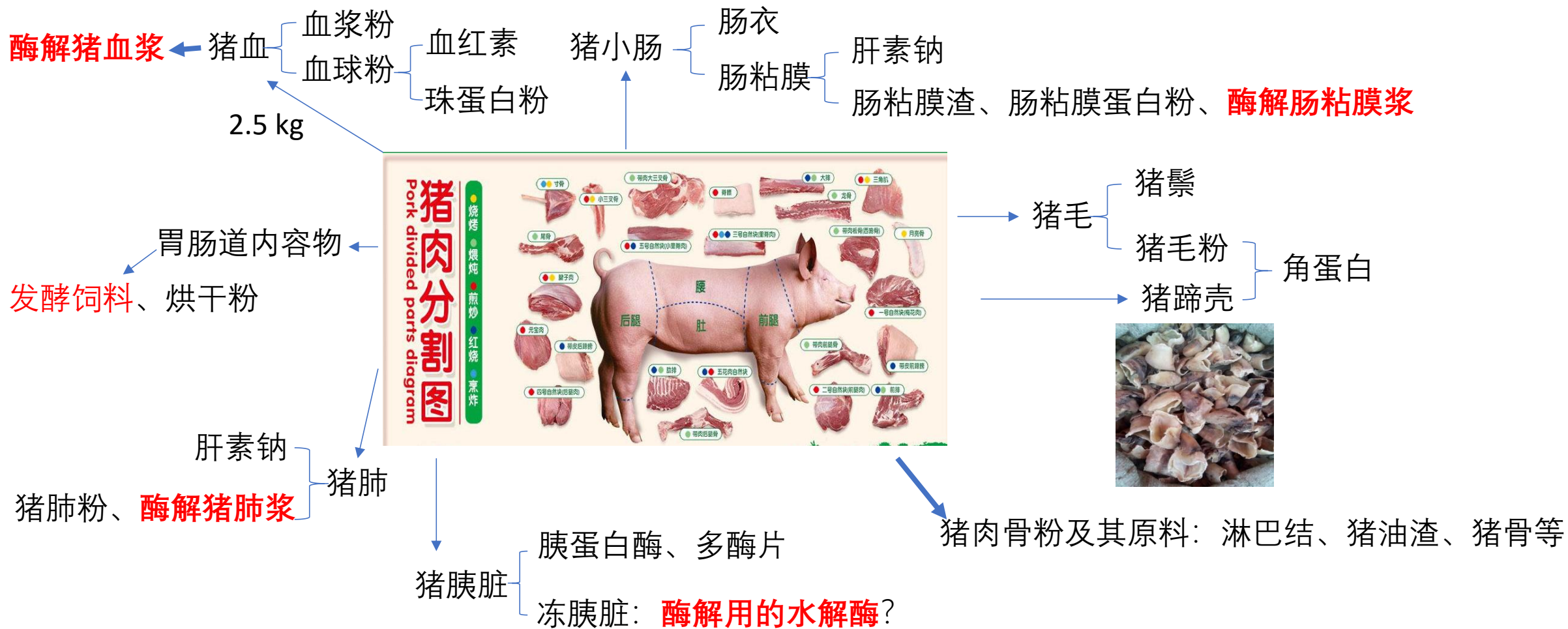


核苷肽
(酵母酶解粉)

指标: 粗蛋白 \geq 45%, 氨基酸态氮 \geq 2%, 水分 \leq 8%, 粗灰分 \leq 8%

重庆长诺生物科技有限公司

苏州大学基础医学与生物科学学院，江苏省水产动物营养重点实验室
江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号



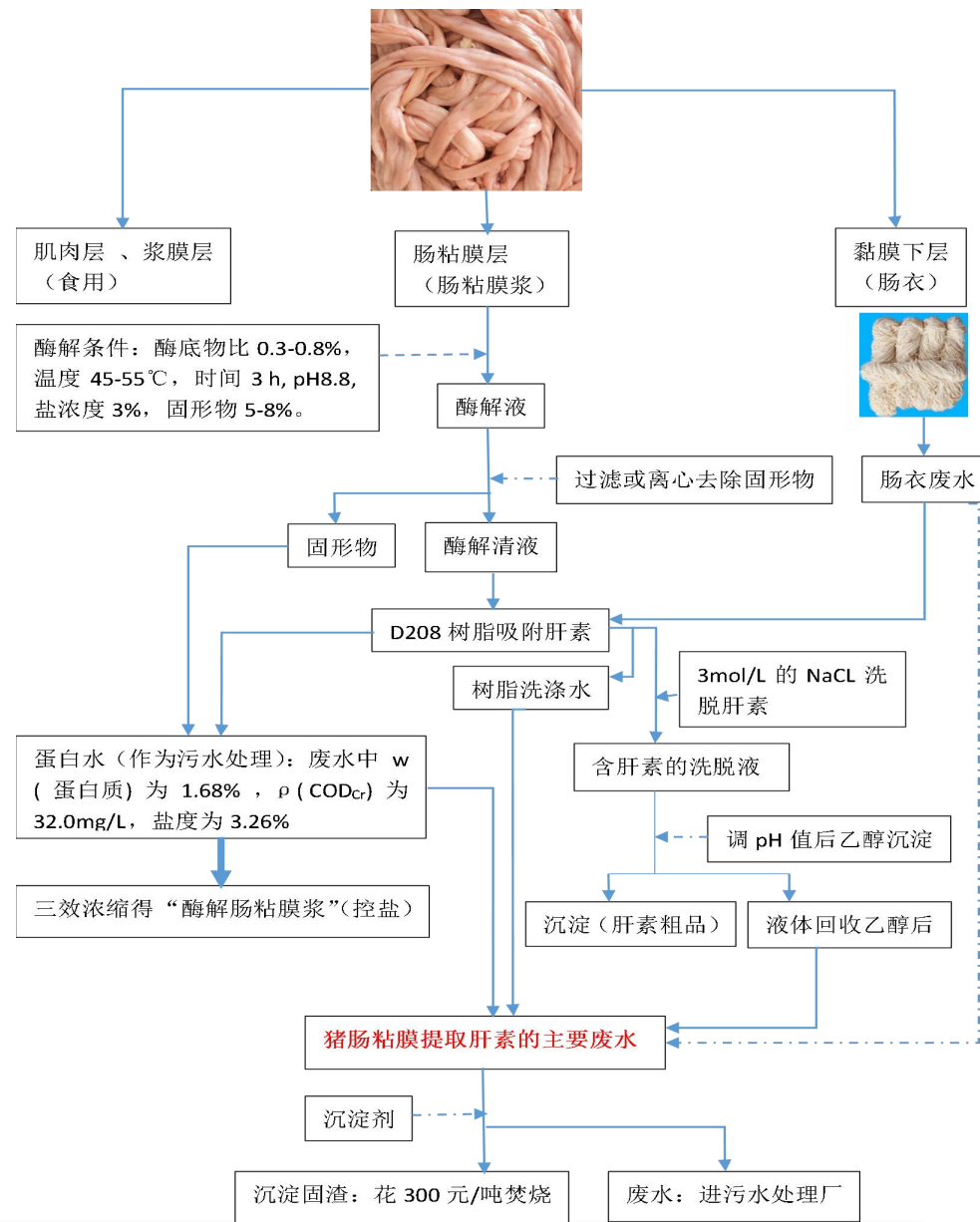
猪屠宰副产物的饲料化资源与途径

案例：酶解法提取肝素的酶解浆

以**猪小肠黏膜**为原料，采用酶解技术提取肝素，其酶解液作为废物排放，资源没有利用。

如果在肝素生产车间附件，引流酶解液经过浓缩得到酶解液，其实就是猪小肠黏膜酶解浆。

也有以**猪肺**为原料，同样的原理生产肝素的废水，也可以得到酶解浆。





鸡壳
(鸡肺)

鸡肉粉
干法鸡肉粉
湿法鸡肉粉 — 蛋白水浓缩

酶解鸡浆



鸡肝粉
酶解鸡肝粉
酶解鸡肝浆



0.1 kg 鸡血
鸡血浆粉
鸡血球粉
酶解鸡血浆 (粉)
羽毛
羽毛粉
水解羽毛粉



鸡肠粉
酶解鸡肠粉
酶解鸡肠浆

鸡肉粉原料: 鸡壳、鸡油渣、其他

酶解鸡溶浆、酶解鸡（鸭）浆

-酶解提高了小肽等功能物质含量、矿物质溶解性

- 酶解鸡溶浆

- 以鸡肉粉蒸煮后压榨水中悬浮物浓缩后酶解（水分50%、蛋白30%、酸溶蛋白/粗蛋白75%--佰伟肽1）

- 酶解鸡（鸭）浆

- 以屠宰后的鸡架、鸭架胶磨机（200目）后酶解（水分50%、蛋白30%、酸溶蛋白/粗蛋白75%--佰伟肽2）

案例：酶解鸡浆

理化检测

检测结果:

检测项目	单位	检测方法	检测结果 001	定量限
相对分子量<1000的物质比例	%	GB/T 22729-2008 附录 A GPC/UV	72.9	-

分子量分布:

分子量范围	峰面积百分比 (%) (λ 220nm)	数均分子量 (Mn)	重均分子量 (Mw)
>5000	7.7	6334	6420
5000-3000	5.8	3820	3904
3000-2000	4.8	2431	2464
2000-1000	8.8	1359	1412
1000-500	13.9	668	696
500-189	41.1	344	357
<189	17.9	-	-

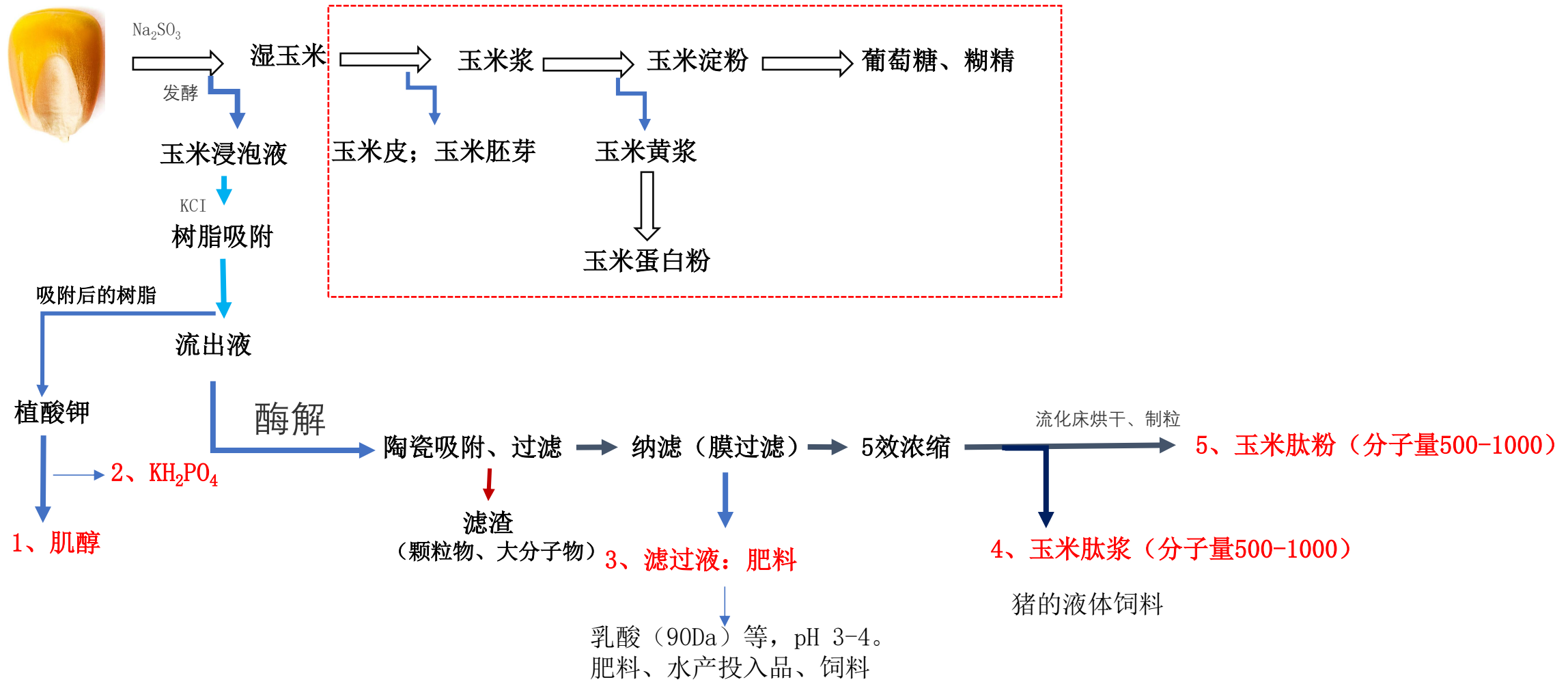
佰伟肽 1号

指标	含量
水分 (%)	≤50.0
蛋白 (%)	≥30.0
酸溶蛋白 (%) (占蛋白)	≥75.0
灰分 (%)	≤15.0
脂肪 (%)	≤7.0
tvbn (mg/100g)	≤200.0

佰伟肽 2号

指标	含量
水分 (%)	≤50.0
蛋白 (%)	≥30.0
酸溶蛋白 (%) (占蛋白)	≥75.0
灰分 (%)	≤13.0
脂肪 (%)	≤6.0
tvbn (mg/100g)	≤200.0

玉米浸泡水：系列产品



使用酶解浆浆后的生产效果的主要表现

1. 饲料的诱食活性显著增加
 - 工厂化、小棚虾、高位池虾：要求喜欢吃、吃得饱、易消化，60min内吃完饲料，否则“闷气头”
 - 蛙：需要强的优势性、饲料动感
 - 肉食性鱼类、尤其是鱼食性鱼类（海水、淡水）：需要强的优势活性
2. 消化吸收率显著提高：水产动物消化道短，满足易消化、快吸收的要求
 - 酶解产品：相当于体外提前消化3-4h，消化率、吸收率显著提高
3. 功能性更强大，鱼虾蟹的生理健康、抗应激能力显著改善
 - 酶解过程释放更多的生物活性物质：如酵母细胞壁（以及海藻、大豆）的破坏释放更多的细胞内物质；如蛋白质结合态的虾青素转变为游离态的虾青素
 - 肽种类和数量显著增加：肽功能与营养
 - 游离态氨基酸、核苷酸、寡糖等活性成分含量显著增加
4. 生产性能（生长速度和饲料效率）显著提高，鱼粉、鱼油减量作用显著
 - 易消化、易吸收，对生产性能提供的的作用显著
 - 在健康生理状态下生产性能更好
5. 养殖渔产品食用质量显著改善：好看、好吃、吃得营养、吃得安全的水产品
 - 体内沉积的游离氨基酸、核苷酸等改善滋味
 - 对肌纤维质量的改善
 - 对肌肉脂肪沉积位点、沉积率的改善作用强

饲料肽的作用 (deepseek)

- 1. 促进消化吸收:**
 - 易吸收: 肽比蛋白质更易被肠道吸收, 能快速提供氨基酸, 提升饲料利用率。
 - 增强消化酶活性: 某些肽能刺激消化酶分泌, 进一步促进营养吸收。
- 2. 提供氨基酸:**
 - 氨基酸来源: 肽在体内分解为氨基酸, 用于蛋白质合成和代谢。
 - 平衡氨基酸: 特定肽可补充饲料中缺乏的必需氨基酸, 改善氨基酸平衡。
- 3. 增强免疫功能:**
 - 免疫调节: 某些肽能调节免疫反应, 增强动物抗病能力。
 - 抗氧化: 部分肽具有抗氧化作用, 减少自由基对细胞的损害。
- 4. 促进生长:**
 - 生长因子: 某些肽能刺激动物生长激素分泌, 促进生长发育。
 - 提高生产性能: 添加肽可提高饲料转化率, 增加体重和产量。
- 5. 改善肠道健康:**
 - 益生元作用: 部分肽能促进有益菌生长, 维持肠道菌群平衡。
 - 增强肠道屏障: 某些肽可增强肠道屏障功能, 减少病原体入侵。
- 6. 抗应激:**
 - 缓解应激反应: 特定肽能调节应激激素分泌, 减轻环境或管理因素引起的应激。
 - 提高适应性: 肽可增强动物对不良环境的适应能力。
- 7. 改善产品品质:**
 - 肉质改善: 某些肽能提高肉类的嫩度和风味。
 - 蛋品质提升: 在蛋鸡饲料中添加肽可改善蛋壳强度和蛋黄颜色。



浙江丰宇搅叶+闪蒸的低温干燥系统



风送至仓库，不落地吨包储存



闪蒸
物料温度：50-60°C
干燥时间：十几秒



干燥后物料冷风吹送，快速冷却至25°C以内

超滤、反渗透分离后的筛选试验

- 采用超滤离心、过滤（依据分子量大小分离）后，经过养殖评估（生长速度、鱼体健康）
 - 滤渣（大颗粒）的养殖效果显著低于滤液的养殖效果，“未知生长”因子可能在滤液中
- 采用反渗透出去盐分等小分子：得到的不同分离物进行养殖评估
 - 反渗透后，养殖效果下降
 - 除盐份的同时也除去了一些无机盐，导致养殖效果下降
 - 也除去了一些小分子如一氧化氮



案例：海洋生物浓缩包（海味素）

- 产品形态：粉剂（+载体后低温干燥）
- 蛋白质含量：±40%
- 成分：酶解鱼肽、酶解乌贼浆、酶解海藻等分离浓缩物
- 鱼肽：酶解鱼溶浆→超滤→分子≤1000Da的肽；
- 酶解乌贼浆：乌贼内脏→酶解→反渗透（脱盐和重金属）
- 海藻水解→压榨→海藻多糖水解液
- 鱼肽+酶解乌贼浆+海藻多糖+海藻（载体）→搅叶+闪蒸（低温干燥）
→多元海味素粉

酶解浆的选择与使用：2-4种浆组合使用、10%以上的添加量

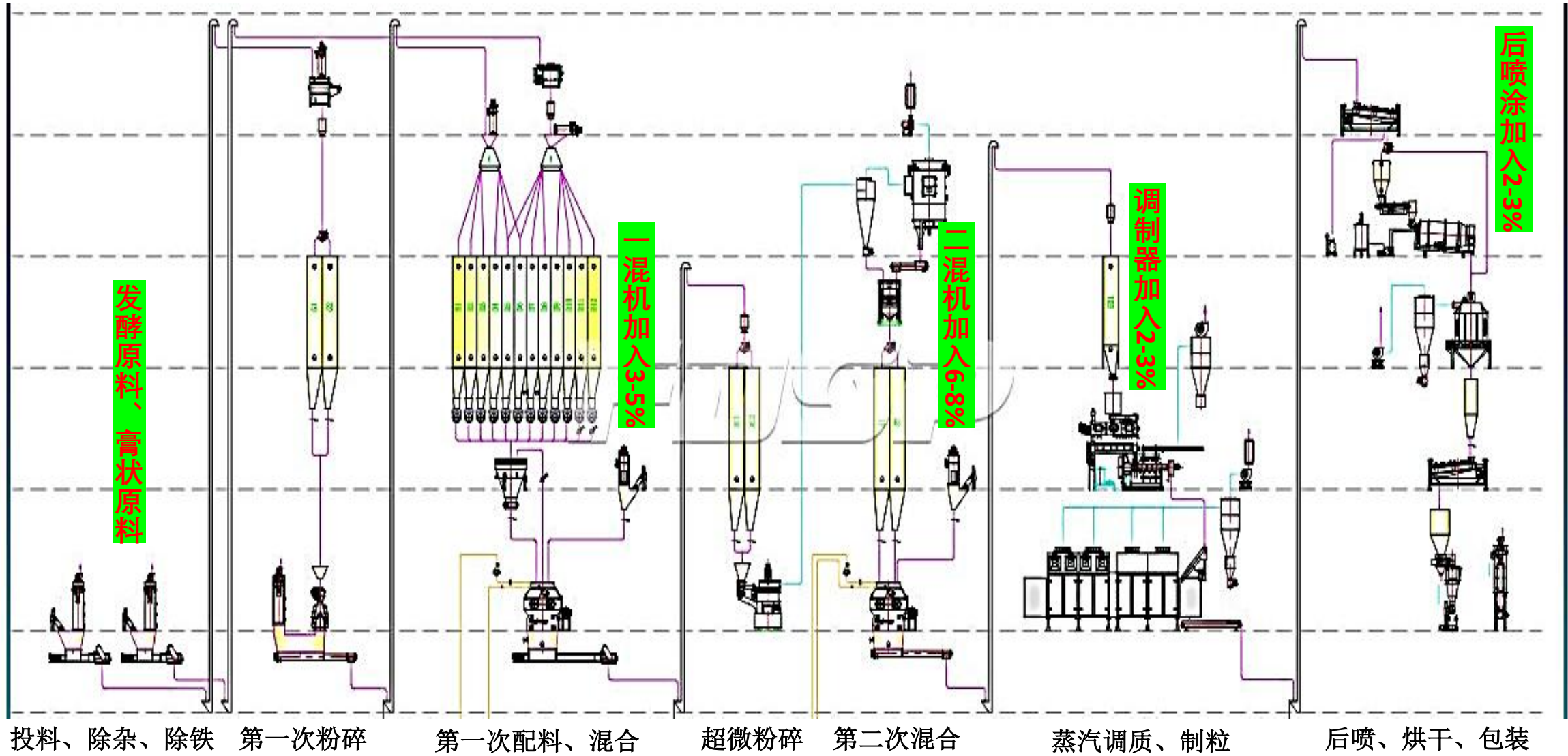
酶解浆	功能特征	生产添加方式	配方中添加量，%
酶解鱼浆、酶解鱼溶浆、酶解虾溶浆	海洋生物活性物质、诱食、肽营养、肉质改善	一混或二混机喷入、后喷	2-8
虾膏、乌贼膏、酶解酵母浆、藻膏	海洋生物活性物质、诱食、肽营养、色素、肉质改善	鱼豆粕、菜粕等混合、粉碎后一混机加入	2-4
酶解鸡浆、酶解鸡肝浆、酶解肠粘膜浆等	肽营养、诱食性	一混或二混机喷入	3-6
酶解酵母浆	免疫增强、肠道健康、诱食、肽营养、肉质改善	一混或二混机喷入、后喷	2-4
酶解玉米蛋白浆、大米蛋白浆等	肽营养	一混或二混机喷入	3-6

虾蟹料：酵母酶解浆、酶解虾溶浆、酶解鱼浆或鱼溶浆的组合使用

肉食性鱼类、蛙类饲料：酵母酶解浆、酶解鱼浆或鱼溶浆、酶解鸡浆的组合使用

杂食性鱼类饲料：酵母酶解浆、酶解鱼浆、酶解玉米肽、酶解鸡浆的组合使用

高湿、液态原料（水分46-52%）的加入位置；最高可添加13%（约6.5%的水）



真空喷涂：可以加油，也可以加酶解浆



20%发酵液或酶解液三次喷涂（6%+6%+8%），真空
负压1000Pa



蘇州大學

SOOCHOW UNIVERSITY



二、利用微生物、昆虫开发新型功能性 油脂资源

不要只是关注蛋白质原料，油脂原料也值得关注和投资

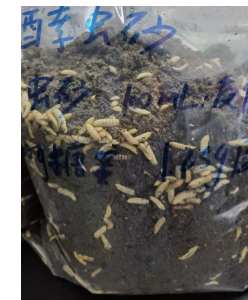
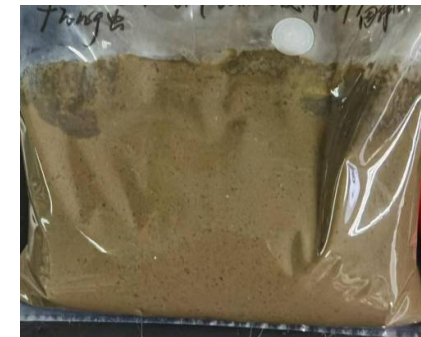
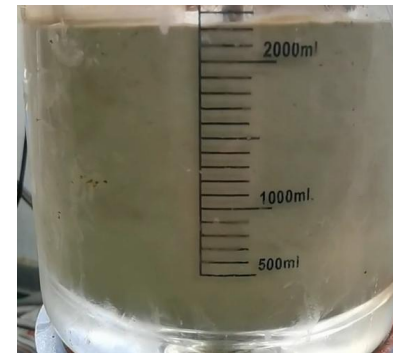
昆虫油脂和蛋白质-黑水虻为主

- 高油脂含量：
 - 黑水虻幼虫：油脂占干重的30%-40%，其中月桂酸（C12:0）占30%-50%，具有抗菌功能（Barragan-Fonseca et al., 2017）。
 - 黄粉虫：油脂含35%-45%亚油酸（ ω -6），适合淡水鱼需求。
 - 家蝇幼虫：EPA含量可达2%-5%（通过饲料强化）。
- 经济性：

昆虫养殖成本约 2-4/kg油脂，且可利用餐厨垃圾转化，**碳足迹比豆油低 50%**（*van Huis, 2021*）
- 案例
 - 虹鳟饲料中用黑水虻油替代50%豆油，增重率提高10%，肠道炎症标志物降低20%（Belghit et al., 2019）。
 - 罗非鱼饲料添加10%黄粉虫油，肌肉 ω -6含量增加35%，不影响生长（Henry et al., 2018）。

黑水虻适宜的饲料产品形式

- 鲜虫（冻虫）
 - 主要用于养殖现场，蛙、蟹、虾、鳖、鱼等
 - 可以与常规颗粒饲料混合投喂（比例 $\leq 20\%$ ）
- 虫干（虫粉、脱脂虫粉）
 - 如何烘干？氧化是最大问题（好原料可能变成有害的原料）！
- 虫浆：可能是最合适的产品形式
 - 发酵虫浆
 - 酶解虫浆
 - 保鲜虫浆
- 黑水虻油脂：功能性昆虫油脂
 - 具有抗菌、杀菌功能的月桂酸及其酯类，黑水虻特有！
- 黑水虻虫沙：
 - 培养基质，其中还有2-3%的虫体和壳



黑水虻饲料资源的价值

营养价值：重要的蛋白质和油脂原料

- 指标：蛋白质+油脂
- 培养基的影响显著（含量 50% - 90%）

抗菌肽：种类多

- 诱导性产生，鲜活虫
- 消减病原菌、增强免疫防御能力

月桂酸及其单甘脂：月桂酸占干虫的 10%，昆虫中黑水虻特有

- 独特的抗菌作用、**强大的抗菌性能**
- 其他脂质成分



功能肽：定向酶解、可控酶解产生

- 酶解后产品质量和使用效果显著提高
- 抗氧化肽、代谢活性肽

几丁质：占干虫 4% - 6%

- 未水解：对消化率有影响
- 水解：功能产物-几丁二糖等
- 抗菌、抗氧化、增强免疫

激素含量高：幼虫期要经历 5 次脱壳，体内代谢激素含量高

- 增强动物整体代谢强度、生命活力



江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号

江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号

新概念：破壁后的**微生物全细胞营养**（**Whole Cell Nutrition, WCN**）（酵母油脂和真菌油脂）

- **定义：**
直接利用完整或破壁的微生物细胞（酵母、微藻、细菌等）作为饲料原料，保留细胞内全部活性成分（油脂、蛋白、多糖、维生素等），而非单一提取物。
- 微生物全细胞营养通过“**油脂+蛋白+功能因子**”三位一体的优势，成为水产饲料升级的核心方向：
 1. **高性价比：**综合成本比分离原料低30%-50%；
 2. **绿色安全：**减少抗生素和鱼粉依赖，符合碳中和趋势；
 3. **精准营养：**可定制化发酵（如高DHA菌株、富硒酵母）。

与传统原料对比

对比项	全细胞营养	传统分离原料（如豆粕+鱼油）
成分完整性	多营养素协同作用	单一营养素为主
加工成本	低（省去提取步骤）	高（需多道分离纯化）
生物利用率	高（细胞壁破壁后易吸收）	受抗营养因子影响

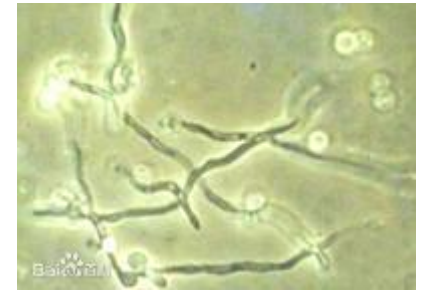
微生物油脂（单细胞油脂，SCO）：酵母油脂

- 高产油菌种：
 - 酵母（如 *Yarrowia lipolytica*）：油脂含量可达细胞干重的50%-70%，其中 ω -3脂肪酸（如EPA、DHA）占比可达15%-30%（*Ryabova et al., 2020*）。
 - 微藻（如裂殖壶菌 *Schizochytrium* sp.）：DHA含量占油脂的40%-50%，EPA占10%-15%，适合替代鱼油（*Winwood, 2013*）。
 - 真菌（如 *Mucor circinelloides*）：可生产 γ -亚麻酸（GLA），含量达油脂的15%-20%。
- 可持续性：

微生物培养可利用工业废料（如糖蜜、秸秆水解液）作为碳源，生产成本可降至 **\$1.5-\$3.0/kg油脂**。
- 案例
 - 在鲑鱼饲料中用 *Schizochytrium* 藻油替代50%鱼油，鱼体DHA含量无显著差异，生长率提高8%（*Kiron et al., 2016*）。
 - 对虾饲料中添加酵母油脂（含12% EPA），成活率提升12%，饲料系数（FCR）降低0.3（*Li et al., 2021*）。

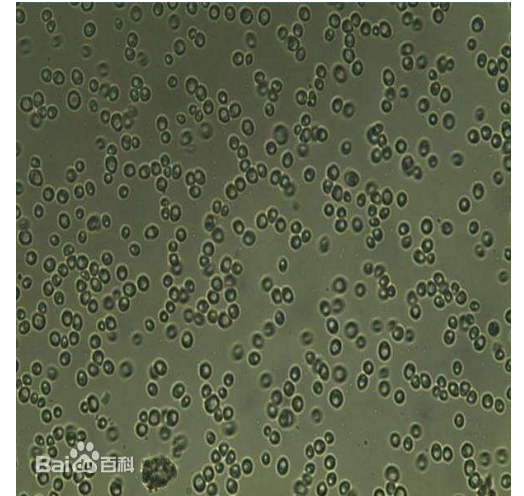
解脂假丝酵母 (*Yarrowia lipolytica*)

- 隐球酵母科、假丝酵母属的工业微生物，属于真菌门半知菌亚门。是一种非常规酵母，属于半子囊菌类 (*Hemiascomycetes*)，只能利用葡萄糖、甘油、醋酸盐以及乙酰氨基葡萄糖苷为碳源进行生长。属于典型的产油酵母，细胞内脂肪酸、脂酰辅酶 A 以及乙酰辅酶 A 的积累量较高，可以在细胞内积累脂质至其细胞干重的 40%。
- 菌体细胞呈卵形至香肠形，大小为 $3\sim 5 \times 5\sim 11 \mu\text{m}$ ，长形细胞可达 $20 \mu\text{m}$ 。
- 在麦芽汁琼脂培养基上形成乳白色粘湿无光泽菌落，部分菌株表面呈皱褶状；玉米粉琼脂培养时可见假菌丝及具横隔的真菌丝，顶端或中间着生单个或成双芽生孢子。
- 该菌可从黄油、石油井口油黑土及炼油厂附近含油脂环境中分离。



斯达氏油脂酵母 (*Lipomyces starkeyi*)

- 是一种具有高效油脂合成能力的单细胞真核微生物，其生理特性体现为可利用葡萄糖、木糖等多种碳源进行发酵产油。
- 在优化条件下（碳氮比90:1、pH5.5、30°C）油脂含量可达43%-55.7%，展现出工业化生产潜力。
- 可同时代谢葡萄糖与木糖（比例2:1），总利用率达75.1%。菌体在限氮条件下触发油脂积累机制，胞内脂质含量可占干重55%以上（孔祥莉等，2007）。



与传统油脂的性能对比

指标	鱼油	豆油	微生物油脂（藻油）	昆虫油脂（黑水虻）
EPA+DHA含量	20%-30%	<1%	30%-50%	<5%
生产成本	4-6/kg	1-2/kg	1.5-3.0/kg	2-4/kg
可持续性	资源枯竭	耕地依赖	无耕地需求	废物转化
功能性成分	天然 ω -3	无	高纯度 ω -3	抗菌月桂酸

高产油酵母菌种及油脂含量

酵母菌种	油脂含量（占干重）	主要脂肪酸组成	最优碳源	文献来源
<i>Yarrowia lipolytica</i>	50%–70%	棕榈酸（C16:0）、油酸（C18:1）、亚油酸（C18:2）	葡萄糖/甘油	Beopoulos et al., 2009
<i>Lipomyces starkeyi</i>	40%–65%	油酸（C18:1）、棕榈酸（C16:0）	木糖/纤维素水解液	Zhao et al., 2018
<i>Rhodotorula toruloides</i>	45%–60%	油酸（C18:1）、亚油酸（C18:2）	甘蔗渣/淀粉废水	Li et al., 2020
<i>Cryptococcus curvatus</i>	50%–65%	棕榈酸（C16:0）、硬脂酸（C18:0）	乳清渗透液	Zhang et al., 2011

- 油脂含量受培养条件（碳源、C/N比、溶氧等）影响显著。例如，***Y. lipolytica* 在限氮条件下油脂含量可达70%**。
- 工程菌株：通过基因改造（如过表达ACC、DGAT基因）可进一步提升产油率。例如，改造后的 *Y. lipolytica* 产油量提高30%（Qiao et al., 2017）。

酵母油脂的脂肪酸组成

脂肪酸类型	占比 (%) *	典型菌种示例	水产饲料应用价值
棕榈酸 (C16:0)	15%-25%	<i>Lipomyces starkeyi</i>	提供能量，但过量可能致肝脂肪沉积
油酸 (C18:1)	35%-50%	<i>Yarrowia lipolytica</i>	易消化，促进生长
亚油酸 (C18:2)	10%-20%	<i>Rhodotorula toruloides</i>	ω -6来源，需与 ω -3平衡
硬脂酸 (C18:0)	5%-15%	<i>Cryptococcus curvatus</i>	饱和脂肪酸，利用率较低
其他	<5% (如EPA/DHA)	基因改造菌株 (如表达 Δ 12/ Δ 15去饱和酶)	功能性 ω -3补充

导入微藻 Δ 4去饱和酶基因的 *Y. lipolytica* 可生产DHA (占油脂5%-10%) (*Xue et al., 2022*)

高油脂的海洋真菌→替代鱼油的海洋生物油脂

-赋能DHA的原料、工业化培养的海洋微藻（真菌）原料

-裂壶菌（藻）（*Schizochytrium sp*）、吾肯氏壶菌（藻）（*Ulkenia amoeboida*）、寇氏隐甲藻(菌）（*Cryptecodinium cohnii*）



裂壶菌（藻）

藻油（DHA≥35%）-替代鱼油

裂壶菌（藻）浓缩浆

-海洋生物油脂、DHA油脂（粗脂肪60%-干重）

藻膏

-菌体（藻体、残油）

高产油酵母菌种及油脂含量

酵母菌种	油脂含量（占干重）	主要脂肪酸组成	最优碳源	文献来源
<i>Yarrowia lipolytica</i>	50%–70%	棕榈酸（C16:0）、油酸（C18:1）、亚油酸（C18:2）	葡萄糖/甘油	Beopoulos et al., 2009
<i>Lipomyces starkeyi</i>	40%–65%	油酸（C18:1）、棕榈酸（C16:0）	木糖/纤维素水解液	Zhao et al., 2018
<i>Rhodotorula toruloides</i>	45%–60%	油酸（C18:1）、亚油酸（C18:2）	甘蔗渣/淀粉废水	Li et al., 2020
<i>Cryptococcus curvatus</i>	50%–65%	棕榈酸（C16:0）、硬脂酸（C18:0）	乳清渗透液	Zhang et al., 2011

- 油脂含量受培养条件（碳源、C/N比、溶氧等）影响显著。例如，***Y. lipolytica* 在限氮条件下油脂含量可达70%**。
- 工程菌株：通过基因改造（如过表达ACC、DGAT基因）可进一步提升产油率。例如，改造后的 *Y. lipolytica* 产油量提高30%（Qiao et al., 2017）。



蘇州大學

SOOCHOW UNIVERSITY



三、天然粘合剂作为水产饲料“节粮”方案的科学路径

节粮： 每吨饲料减少粮食用量50-80kg，降低配方成本3-5%

增效： 提升颗粒稳定性（耐水时间+50%）、消化率（蛋白利用率+10%）

四大类天然粘合剂及节粮应用

1. 海藻提取物

- 代表：海藻酸钠、卡拉胶、琼脂
- 节粮机制：
 - 替代淀粉的粘合功能（**1kg海藻酸钠 ≈ 50kg小麦面筋的粘合力**）。
 - 富含矿物质（褐藻酸钙），减少额外矿物质添加。
- 适用场景：
 - 海水鱼料（κ-卡拉胶耐盐）、虾蟹蜕壳料（海藻酸钠促蜕皮）。

2. 微生物多糖

- 代表：黄原胶、普鲁兰多糖、酵母β-葡聚糖
- 节粮机制：
 - 发酵生产（碳源可为糖蜜或秸秆水解液），不占用粮食资源。
 - 黄原胶0.1%可替代3%预糊化淀粉。
- 适用场景：

• 膨化料（耐高温）、功能性饲料基础免疫与增强剂。

江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号

3. 植物胶

代表：魔芋胶、瓜尔胶、塔拉胶

节粮机制：

源自经济作物（如魔芋），不与主粮争地。
魔芋胶吸水膨胀30倍，减少淀粉用量。

适用场景：

软颗粒饲料、低温制粒料。

4. 蛋白类粘合剂

代表：酶解鱼浆、明胶、昆虫蛋白

节粮机制：

利用加工副产物（如鱼溶浆）或非粮蛋白（昆虫），替代谷物能量源。

5%酶解鱼浆可替代8%小麦+2%鱼粉。

适用场景：

肉食性鱼类（石斑鱼、鲈鱼）高蛋白饲料。

水产饲料常用天然粘合剂特性对比：植物、海藻、微生物来源

粘合剂	添加量	成本（元/吨饲料）	优势	潜在风险	适用品种
黄原胶	0.1-0.3%	15-30	耐酸碱、耐高温，功能多	过量（>0.5%）可能致肠道粘液过度分泌	对虾、海水鱼、蛙类
卡拉胶	0.05-0.2%	20-40	强凝胶性，替代淀粉效果好	降解产物（κ-卡拉胶）可能引发炎症	肉食性鱼（鲈鱼、鳜鱼）
瓜尔胶	0.3-0.5%	10-20	低成本，天然可降解	粘度受pH影响大（酸性环境失效）	普通淡水鱼（草鱼、鲤鱼）
海藻酸钠	0.2-0.4%	30-50	富含矿物质，促进甲壳动物蜕壳	高价，添加量需精准控制	蟹类、虾类
黄腐酸	0.01-0.05%	50-80	增强免疫力，改善肠道微生态	色深，可能影响饲料外观	苗种阶段（鱼苗、虾苗）

- 避免粘合剂形成高粘度胶体阻塞肠腔（如卡拉胶需控制分子量<100 kDa）。
- 黄腐酸、海藻多糖可促进益生菌（乳酸菌）增殖，但过量（>0.1%）可能抑制蛋白酶活性。
- 定期检测肝胰脏指数（HSI）和血糖水平，确保无代谢负担。



蘇州大學

SOOCHOW UNIVERSITY



四、利用发酵生产单体氨基酸的底盘技术， 开发蛋白质、氨基酸发酵原料

思考：单体赖氨酸市场价格7000元/吨，如果发酵后不分离，作为发酵蛋白质原料呢？
蛋白质含量70%左右、赖氨酸含量大于15%，这不是很好的原料吗？

中国主要单体氨基酸生产情况

氨基酸	主要生产菌株	中国年产量 (吨)	主要企业	应用领域
谷氨酸	<i>Corynebacterium glutamicum</i>	300万吨以上	阜丰集团、梅花生物、伊品生物	味精、食品添加剂
赖氨酸	<i>C. glutamicum</i> (高赖氨酸突变株)	200万吨以上	大成生化、梅花生物、希杰(中国)	饲料添加剂
苏氨酸	<i>E. coli</i> 工程菌	50-60万吨	梅花生物、阜丰集团、星湖科技	饲料、医药
色氨酸	<i>E. coli</i> 或 <i>C. glutamicum</i>	3-5万吨	梅花生物、安徽华恒生物、浙江新和成	饲料、医药前体
缬氨酸	<i>C. glutamicum</i>	10-15万吨	阜丰集团、宁夏伊品、山东恩贝	饲料、输液制剂
异亮氨酸	<i>E. coli</i> 工程菌	2-3万吨	江苏汉光甜味剂、华恒生物	医药、保健品
精氨酸	<i>C. glutamicum</i> 或 <i>Bacillus</i>	5-8万吨	广东肇庆星湖科技、山东鲁抗医药	医药、营养补充剂
脯氨酸	<i>C. glutamicum</i>	1-2万吨	安徽华恒生物、浙江鑫富药业	化妆品、医药
组氨酸	<i>E. coli</i> 工程菌	500-1,000吨	上海兆维生物、江苏汉光甜味剂	医药注射液
胱氨酸	毛发酸水解提取 (非发酵法)	5,000-8,000吨	河北东华化工、湖北新生源	医药、化妆品

苏州大学基础医学与生物科学学院, 江苏自办, 动物自办, 希杰, 天独主

江苏省苏州市工业园区高等教育区仁爱路199号

单体氨基酸的生产条件

氨基酸	碳源	氮源	菌株	温度	pH	发酵时间	产酸率
谷氨酸	葡萄糖/糖蜜	尿素/液氨 + 玉米浆	<i>C. glutamicum</i>	30-32°C	7.0-7.2	30-40h	80-120 g/L
赖氨酸	葡萄糖	硫酸铵 + 玉米浆	<i>C. glutamicum</i> 突变株	32-34°C	6.8-7.0	50-60h	100-150 g/L
色氨酸	葡萄糖	硫酸铵 + 前体	<i>E. coli</i> 工程菌	33-35°C	6.8-7.0	60-72h	30-50 g/L
精氨酸	蔗糖	硫酸铵 + 尿素	<i>B. subtilis</i>	34-36°C	7.2-7.5	65-75h	40-60 g/L

1. **碳源选择:** 葡萄糖是主流, 糖蜜用于低成本生产 (需脱色)。
2. **氮源策略:** 硫酸铵 (廉价) vs. 尿素 (易分解, 需控pH)。

微生物发酵的蛋白质原料营养优势

营养特性	具体优势	对动物的益处
蛋白质	含量高 (40-80%)、氨基酸平衡 (富含赖、蛋氨酸)、消化率高	促进生长, 提高饲料转化率, 减少氮排放
维生素	天然B族维生素 (包括B12)、维生素D/E前体等	维持正常代谢, 促进健康, 减少维生素预混料添加
矿物质	富含磷、钾、镁及生物螯合的微量元素 (硒、锌等)	提高矿物质吸收率, 增强骨骼健康、抗氧化能力, 减少排放
功能性成分	核苷酸、 β -葡聚糖、甘露寡糖、不饱和脂肪酸 (DHA/EPA)	促进肠道发育, 增强免疫力, 调节肠道健康, 改善肉质

谢谢观看！