

单细胞蛋白的国内外研究 动态及展望

关 洁

广州市科学技术情报研究所

一九八一年六月

中國應見白粉國內研究 動 態 與 展 望

王 健

中國社會科學院毒品研究所

一九九一年六月

目 录

一、引 言	1
二、以传统原料生产单细胞蛋白的国外动态	9
(一) 淀粉原料	9
(二) 糖类原料	13
三、以纤维原料生产单细胞蛋白的国外动态	18
(一) 美国路易士安那州立大学法	19
(二) 美军纳蒂克发展中心法	21
(三) 美国通用电气公司法	23
(四) 加拿大滑铁卢大学法	25
四、以石油工业产品为原料生产单细胞蛋白的国外动态	26
(一) 液体烷烃材料	26
(二) 甲烷原料	33
(三) 甲醇原料	35
(四) 乙醇原料	42
五、以其他原料生产单细胞蛋白的国外动态	45
六、国内单细胞蛋白生产研究动态	47

七、讨论、展望和建议	56
(一) 单细胞蛋白作为蛋白质源的经济价值	56
(二) 对单细胞蛋白氮源利用及生产规模经济性的探讨	59
(三) 关于单细胞蛋白科研的建议	61
参考文献	64

单细胞蛋白的国内外研究 动态及展望

一、引言

人类为了能够生存，必须进食。据营养学家的计算，假如人们的食物只作为人体热量的补充，平均每人每天吃0.7公斤蔗糖或0.8公斤大米就足够了。但是，为了人体的生长和恢复，食物中的蛋白质还是必不可少的。一个成年人平均每日需摄取蛋白质60~68克，其中需有一半是动物性蛋白质或其他代用品以保证各种必需氨基酸的平衡供应。目前世界人口不断增长，如何为日益增加的人口提供足够的食物，特别是提供食物中占重要地位的蛋白质，已成为一个世界性的主要研究课题。至今为止，人类的主要蛋白质食物是来自动物或植物的肉、蛋、奶、鱼和豆类等。要发展植物性蛋白质的生产，受到耕地面积、气候、劳动力等因素的限制。要发展能供给动物性蛋白质的畜牧业或水产业，必须依靠农业和它自身来为所养殖的动物供给必需量的蛋白质。这两种生产方式都已远远不能适应急剧增长人口的需要，因此，在原有的农业和畜牧水产业的生产方式外，寻求一些有效地生产蛋白质的途径，是一个亟待解决的问题。

为了解决这个问题，国外从五十年代开始就为开辟提供蛋白质的新途径而进行范围十分广泛的研究。至六十年代初，出现了单细胞蛋白。近二十年来，它的研究和发展十分迅速。

所谓单细胞蛋白，主要是指藻类、非致病性细菌、酵母、真菌和某些原生动物等单细胞生物体。国外简称SCP (Single

Cell Protein)。它具有以下的特点：

1. 单细胞生物世代周期短，生产繁殖速度极快，以生物繁殖达到自体重量一倍的时间即所谓“重量倍增时间”来比较，单细胞生物的繁殖速度比植物快数十倍至数百倍，比动物快数百倍至数千倍。^[1]（见表一）

表一 各种生物在繁殖速度最高时的重量倍增时间^[1]

生 物	重量倍增时间
细菌及酵母	20~120分
霉菌及藻类	2~6小时
草及某些植物	1~2周
鸡	2~4周
猪	4~6周
牛	1~2月
人	3~6月

2. 它的生产可以抛弃传统的农业生产方式，在有限空间的工厂里进行，可以节省耕地，节省能量，节省人力，在六十年代中期，美国学者A.E.Humphrey^[1]设想若是生产食用酵母作为补充旦白质，以10%的比例添加到食物中来满足全球30亿人口需要的话，所需发酵设备的体积是290万立方米，占地面积是1.3平方公里，可是以同样面积土地种植牧草喂牛所能提供的旦白质，只能供给数千人的需要。日本学者增山邦英^[2]曾作农业、畜牧水产业和微生物发酵三种方式生产旦白质的能量效率统计比较，认为要生产同等数量的旦白质，单细胞旦白的效率是最高的。考虑到供给植物光合作用的能源——阳光是无偿的，以实际生产所应支付的能量来计算能量经济效率，植物性旦白质是最低的，而大多数单细胞旦白的能量经济效率一般均低于畜牧水产业（见表二）。此外，由于单细胞旦白是工业化生产，易于实现自动化，要生产

同等数量的旦白质所耗人力很少。例如，瑞典一个以淀粉废水为原料日产单细胞旦白10吨的工厂，发酵缸容积为300立方米，仅需一人操作。〔3〕

3. 单细胞旦白营养丰富，干燥产品的粗旦白质含量可达40~80%（视不同菌种而异），还含有丰富的必须氨基酸和多种B族维生素，其营养价值不低于其他动物性或植物性旦白质（见表三）。

4. 培养单细胞旦白的原料来源广泛，也可以廉价地取得。比如淀粉、糖类、食品和造纸工业废料，石油化工产品，天然气，农业纤维废料等都可以用作原料。

表二、旦白质生产的能量效率和能量经济效率比较⁽²⁾

单位：耗能千卡/公斤旦白质

食 品	能 量 效 率	能 量 经 济 效 率
植物性食品		
小麦	8.5×10^6	19.4×10^3
玉米	9.8×10^6	39.5×10^3
大米	3.8×10^6	33.6×10^3
马铃薯	3.7×10^6	20.1×10^3
大豆	2.0×10^6	6.4×10^3
动物性食品		
奶	5.8×10^6	10.0×10^4
鸡旦	12.8×10^6	8.9×10^4
鸡肉	6.2×10^6	5.3×10^4
猪肉	23.6×10^6	18.8×10^4
牛肉	16.0×10^6	14.1×10^4
鳟鱼(养殖)	7.7×10^6	10.0×10^4
微生物(以培养原料计)		
正烷烃	8.4×10^4	6.1×10^4
乳 清	8.7×10^4	8.7×10^4
废糖蜜	6.7×10^4	6.7×10^4
亚硫酸纸浆废液	6.8×10^4	6.8×10^4
甲 醇	7.2×10^4	7.2×10^4
甲 烷	17.0×10^4	17.0×10^4
螺旋藻	46.1×10^4	9.7×10^4

表三、国外各厂家单细胞蛋白产品营养成分

文献来源	22	63.67	66	61	82.83	85	86	97
国 家	芬兰	意大利	西德	英国	西德	瑞典	美国	中国
厂家或研究单位	Tampella	液化	Hoechst	BP	Hoechst	北方旦白	Amoco	华南热作加工所
商 品 名	Pekilo Protein	Liquipron	—	Toprina	Probion	—	Torutein	—
原 料	纸浆废液	石蜡	石蜡	正烷烃	甲醇	甲醇	乙醇	糖蜜
微 生 物	霉菌	酵母	酵母	酵母	细菌	细菌	酵母	霉菌
水 分 %	5.7	5	4.7	—	5	5	6	—
脂 肪 %	1.3	3	9.6	10~12	8	—	7	3.65
粗旦白质 %	55	60	58.4	60	87	81	53	53.83
灰 分 %	6	9	5.1	—	7	7.5	8	—
无氮抽出物 %	25	19	19.3	—	—	—	22	—
粗 纤 维 %	7	4	2.9	—	—	—	5	—
核 酸 %	10	8	4.5	—	10	—	—	6.34
亮氨酸, 克/100克旦白质	7.1	4.8	4.50	7.4	6.6	5.9	7.1	2.87
异亮氨酸, 克/100克旦白质	4.6	3.3	2.94	5.1	3.6	3.7	4.5	2.22
缬氨酸, 克/100克旦白质	5.0	3.2	3.40	5.9	4.8	—	5.7	2.25
苏氨酸, 克/100克旦白质	4.8	3.1	3.35	4.9	4.4	3.6	5.5	2.08
旦氨酸, 克/100克旦白质	1.6	0.8	1.22	1.8	2.7	1.7	1.4	0.51
胱氨酸, 克/100克旦白质	10	—		1.1	—	0.5	0.4	0.36
赖氨酸, 克/100克旦白质	6.5	4.2	5.40	7.4	6.2	4.8	6.6	2.62
精氨酸, 克/100克旦白质	6.5	3.3	2.87	5.1	3.4	4.2	—	2.11
组氨酸, 克/100克旦白质	2.0	0.8	2.88	2.1	2.8	1.3	—	0.77
苯丙氨酸, 克/100克旦白质	4.2	2.5	4.70	4.3	5.1	2.9	4.1	1.77
酪氨酸, 克/100克旦白质	4.0	2.0		3.6		2.4	—	1.58
色氨酸, 克/100克旦白质	1.5	0.6	0.32	1.4	—	4.7	1.2	0.49
甘氨酸, 克/100克旦白质	4.6	—	3.26	—	5.1	—	—	2.26

通过对单细胞蛋白的研究，人们逐渐认识到它的优点，1967年9月，在联合国蛋白质与热量顾问委员会（PAG）的支持下，第一次世界性会议在美国马萨诸塞州理工学院召开。^[4.5]会议把这种由微生物发酵方法所获得的产物命名为单细胞蛋白，专家学者们认为，单细胞蛋白是解决食用和饲用蛋白质供应的一个重要途径。1973年，又在同一地点召开第二次世界性会议。现在，对单细胞蛋白的研究已日渐深入广泛，生产规模亦日益扩大。国际学术性和生产性会议亦频频召开。

我国是发展中国家，国民营养水平很低。据七十年代初期的统计^[6]，我国营养水平属最低水平一类国家，每人每年摄入热量和蛋白质均低于世界平均水平，更远低于发达国家水平。随着农业生产的发展，我国在七十年代中期平均每人每日摄取热量值虽有所增加^[7]，但亦仅为2324千卡，而且热量的主要来源是淀粉质食品，动物性食品仅占8%。我国平均每人每日摄取的蛋白质62.7克，其中动物性蛋白质仅占19%。我国国民营养水平仍属于世界低水平（见表四），要提高食品的数量和质量，发展畜牧业是一个重要措施。但是，我国的畜牧业亦面临着蛋白质饲料不足的严重问题，影响到它的发展。据联合国粮农组织1980年上半年的统计^[8]，1979年我国猪和鸡的存栏数均为世界第一，分别占世界总饲养量的40.0%和21.1%，但由于饲料不足及其他原因，猪肉和鸡肉的产量与存栏数不相称，仅分别占世界产量的29.4%和12.4%，肉类总产量仅为世界产量的15.8%（见表五）。

表四 营养水平比较 (1974~1977)⁽⁷⁾

国 家	年 份	摄 取 热 量			摄 取 旦 白 质	
		数 量 卡/人·日	淀粉质 食品比例 (%)	动物性 食品比例 (%)	数 量 克/人·日	动 物 性 旦 白 质 比 例 %
苏联	1974	3424	47	24	106.7	50
法国	1975	3230	28	39	105.0	66
美国	1975	3199	22	38	102.8	70
加拿大	1975	3127	27	37	98.0	65
英国	1975	3079	29	37	98.4	63
南朝鲜	1974	2542	82	5	71.1	20
日本	1977	2490	51	15	79.5	46
中国	1974	2324	77	8	62.7	19
印度	1974	1971	70	4	48.1	11
菲律宾	1974	1932	70	11	45.6	38

表五 某些国家的禽畜存栏数及肉类产量(1979)⁽³⁾

国 家	存 栏 数, 万 头 (羽)				肉 产 量, 万 吨				
	黄牛及 水牛	山羊及 绵羊	猪	鸡	牛肉	羊肉	猪肉	禽肉	肉类 总产量
美国	11,086. ⁴	1,358. ⁴	6,010. ¹	39,576. ⁹	992. ⁵	13. ³	700. ⁸	852. ⁶	2704. ⁰
苏联	11,444. ⁶	14,810. ⁴	7,348. ⁴	91,520. ⁰	700. ⁰	90. ⁰	530. ⁰	200. ⁰	1,550. ⁰
日本	412. ⁰	9. ¹	949. ¹	30,681. ⁹	39. ⁵	—	140. ⁰	96. ⁰	298. ⁷
中国	9,404. ⁹	16,763. ⁸	30,561. ²	141,336. ⁰	229. ⁹	72. ⁶	1,551. ⁵	347. ⁶	2,320. ⁷
世界	134,257. ¹	152,987. ³	76,346. ¹	670,593. ⁴	4,673. ⁸	739. ⁵	5,278. ⁵	2,803. ⁹	14,663. ⁸

我国在进行经济建设，实现四个现代化的同时，必须提高国民收入水平，提高国民营养水平。旦白质食品的消费量，是营养水平的一个重要指标。我国耕地面积有限，要通过农业的途径迅速增加旦白质的生产，在短时间内仍存在一定的困难。因此，在目前情况下，研究和发发展单细胞旦白这种新型的旦白质，对发展畜牧业，改善国民的食物构成，提高国民健康水平有着重要的现实意义。

在取得单细胞旦白的微生物中，对原生动物的研究基本上处于基础阶段，距离实用还很遥远。^[9]藻类的培养需要阳光，占地面积较大，要大规模地生产还存在一定的困难。至今为止，取得较大进展的是对酵母和细菌两类微生物的研究。二者相比，细菌具有生长速度快，产品旦白质含量高，可利用的原料较广泛的优点。但是，由于细菌形体较酵母小因而分离困难，加上它一时不易为消费者所接受，在工业生产上现以酵母为主。在真菌方面，担子菌类的生产在一些国家由来已久，但主要作为调味性食品，并非作为旦白质来源。真菌中的霉菌类具有可利用原料较广泛，旦白质含量高和形体较大易于分离的特点，近年来研究进展较快的成果已投入应用。

单细胞旦白的工业生产对所选用的微生物必须从以下几个因素进行考虑：(1)培养微生物的炭源应当价廉易得，其他营养物质应当尽量不加或少加；(2)微生物增殖快，基质转换效率高，生物体易于分离回收，在生产过程中最好能产生有用的付产物，从而使生产成本降至最低限度；(3)产品的营养价值高；(4)产品没有毒性，没有致病性，作为食物或饲料易于为用户所接受。

本文试以微生物所同化的炭源为出发，对近年单细胞旦白的研究及生产中具有一定规模的成果作一概要介绍和评论。

二、以传统原料生产单细胞蛋白的国外动态

工业发酵的传统原料是淀粉和糖。用这两种原料生产单细胞蛋白的近年国外动态分别介绍如下：

(一) 淀粉原料

淀粉作为传统发酵原料，在生产过程中多用酸水解法制成葡萄糖浆然后培养微生物。国外食用淀粉价格较高，甚少以它为原料生产单细胞蛋白产品。近年的研究多集中于利用含淀粉废水，以同时取得蛋白质和解决环境污染为目的。此外，亦研究把热带发展中国家盛产的木薯或木薯残渣转化为蛋白质，或用培养微生物的方法增加饲用谷物中的蛋白质含量。

瑞典的糖业公司从六十年代开始致力于研究共生法 (Symba Process) 处理淀粉废水。〔3.11〕它用两种酵母菌，即拟囊拟内孢霉 Endomycopsis fibuliger (E 菌) 和产阮假丝酵母 Candida utilis (C 菌)，在同一培养基上共生。E 菌具有强的淀粉酶，能把淀粉转化为葡萄糖，而 C 菌能利用葡萄糖，增殖迅速。当以木薯淀粉为基质，接入差不多等量的这两个菌株，24 小时后，C 菌增殖约 30 倍而 E 菌约 2.5 倍。〔10〕试验的容积产率是 2 公斤/米³·时。共生法研究经历了实验室试验，间歇法生产等过程后，由瑞典 Sorigona 公司在 Malmö 近郊建设了一家年产单细胞蛋白 2000 吨的工厂，并在 1974 年正式投产。〔3.11.12〕原料采用邻近工厂的马铃薯加工废水。废水日供给量 500 吨，含碳水化合物 2~3%。在非马铃薯加工季节则用木薯淀粉作原料。主要设备发酵缸是连续式的，由 Chemap AG 公司制造，它的容积是 300 立方米 (直径 6 米，高 12 米)，设有 8 个径向排列的板式热交换器，采用下部驱动搅拌方式，操作容积达 240~260 立方米，可日产单细胞蛋白 10 吨。发酵物料在发酵缸停留时间为 10 小

时，稀释速率为 0.1 小时^{-1} 。由于两菌生长速度存在差异，为使发酹缸中两菌比例保持平衡以获得高产率，特设一30立方米的付发酹缸连续培养E菌并往有C菌和E菌的主发酹缸中连续接种。发酹缸温度保持在 35°C 左右。连续发酹运转一般可延续三个月以上。主发酹缸以 $20 \text{ 米}^3/\text{时}$ 的速度排出发酹液。培养液先经筛网，然后用两级酵母离心机分离。所得酵母膏在螺旋干燥机上干燥后即得产品。产品中含C菌98%，E菌2%，平均含旦白质47%，对淀粉的得率为40~45%。产品对动物无害。因旦氨酸含量稍低，添加1%旦氨酸后作饲料出售，其营养价值与酹旦白相同。用共生法处理淀粉废水，进水的生物需氧量BOD为15,000毫克/升，处理后BOD除去率达90~95%，相当于活性污泥法或生物滤池法的处理效果，设备效率达30公斤BOD/米³·日。出售酵母的收入足以抵偿处理费用。

木薯是热带国家盛产的块根淀粉作物，单位面积产量高、价廉，因而木薯利用的研究吸引了许多学者的注意。加拿大与马来西亚学者合作，发展了一个用烟曲霉 Aspergillus fumigatus 把木薯转化为旦白质的简单工艺方法。^[13,14] A. E. Reade 和 K. F. Gregory 选取一个菌株，经伽玛射线诱变处理得到一个变异株 I 21A。这个变异株不会产生芽孢，因而不存在吸入这种芽孢而得曲霉病（一种肺部传染病）的危险，烟曲霉能产生淀粉酶，因此木薯不必水解就可直接接种。该菌的适宜生长条件是 pH 3.5， $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。由于生长条件具有很高的选择性，所以可以采用无灭菌培养。在炭水化合物浓度为4%的木薯糊化液中培养20小时，每升培养液可得包括菌体和木薯残渣在内的产品24克，含粗旦白质37%。如在发酹前将木薯残渣分离，每升培养液可得产品21克，含粗旦白质44%。产品的动物饲养试验表现良好，未见有对动物有害的毒性反应。试验已达3000升发酹缸试

验工厂规模。试验工厂发酵缸为自吸式。木薯经破碎后调成浆在 70°C 糊化。经如此处理后，可能是由于木薯所含有的亚麻苦甙酶使配糖亚麻苦甙分解为氢氰酸而逸出，木薯所具有的抑制微生物生长的因素即被消除。浆液冷却和调至适当温度、 pH 和浓度，加入尿素、磷、钾盐等营养物质，接种（接种量 7%），培养结束后；用压滤机收获产品，产品可以不经干燥以湿料的形式直接用作饲料。由于整个流程无灭菌，无冷冻，不需进行淀粉预水解处理，也不需分离纤维残渣，过滤方式较简，产品也可以不作干燥，因而工艺相当简单，大大降低了生产成本。此外，研究者还分离了两株真菌，一株是头孢霉属 Cephalosporium，另一株是根霉属 Rhizopus，也取得较好的效果。

印度薯类作物中心研究所^[15,16]也进行木薯和木薯皮的发酵研究。所用菌株是具有淀粉酶活性的曲霉属 Aspergillus 和根霉属 Rhizopus。

尼日利亚 Ife 大学也进行类似的研究。^[17]以木薯为原料，采用少孢根霉 Rhizopus oligosporus 及其变异株，也进行了同时用根霉与其他微生物如假丝酵母属 Candida、拟内孢霉属 Endomycopsis、地霉属 Geotrichum、酵母属 Saccharomyces 等混合培养的试验。

美国 B.D. Church, E.E. Erickson 和 C.M. Widmer^[18]报告了用真菌降解的方法处理含淀粉的食品加工废水，同时取得单细胞蛋白。实验室试验表明，接种后废水 pH 保持在 $3.5 \sim 4.5$ 范围内，真菌能保持为优势微生物。选取了一些真菌菌株，经过动物饲喂试验说明其蛋白质质量与大豆相当，再用在废水处理上。在美国已先后建立三个开口的试验性连续发酵装置，其中有两个用于处理玉米和豌豆废水，一个是容量 45 立方米的池子，另一个是容量为 50 立方米的沟，分别在 1969 和 1970 年投入运行。废水由一溢流池连续送入池或沟中，加入硫酸使 pH 保持 3.7 ，连续流加硫酸

铵和磷酸二氢钠。开工时接入绿色木霉 Trichoderma viride，任其生长。废水在处理装置中停留 18~22 小时，流出液用震筛过滤分离菌体。收获的菌体含粗旦白质 56%，废液处理前 BOD_5 为 1600 毫克/升，处理后降至 50~60 毫克/升， BOD_5 除去率为 95~96%。在运行过程中，装置中的微生物曾一度由接种的绿色木霉转为占 70% 的地霉属 Geotrichum 真菌（可能是玉米加工过程中带入的），最后又转为绿色木霉。三个试验性装置的另一个用于处理玉米湿磨废水，是一个容量为 230 立方米的池子，于 1971 年投入运行。用加入盐酸的方法保持 pH 为 4.6，加入玉米浸渍液作营养物。所用真菌为融粘帚霉 Gliocladium deliquescens。由于废液中含有较多的葡萄糖，废液处理的停留时间是 16~24 小时，较该菌在淀粉基质中所需时间缩短约一半。运行时真菌密度为 1,200 毫克/升。排出液经锥形沉淀池沉降，然后用震筛和真空过滤机分离菌体。处理后废液化学需氧量 COD 下降 87%， BOD_5 为 100~280 毫克/升，有时低至 80 毫克/升。用以上方法处理工业废水，出售菌体抵偿处理费用后，可获微利。

A. E. Reade 和 R. H. Smith^[19] 也报告了另一个用简单工艺以大麦为原料生产单细胞旦白的方法。在英国，大麦是主要饲用谷物，半数用于喂猪。大麦平均含粗旦白质 10%，赖氨酸占 4%，未能满足猪饲料粗旦白质 15~20% 和赖氨酸 4.2~4.8% 的要求。Reade 和 Smith 法的目的是通过培养单细胞生物提高饲用大麦的旦白质含量。他们选用一株米曲霉 Aspergillus oryzae。试验发酵缸规模 2700 升。培养液含大麦 2~3%，加入氮磷等营养物质，采用无灭菌操作，在 pH 3.5 条件下通气发酵 12~24 小时，每公斤原料可得到含粗旦白质 39.4% 的干物质 0.51 公斤，每 100 公斤大麦原料所得产品的粗旦白质净增值是 14.5 公斤，所得的湿菌体不必干燥可直接掺入大麦中作猪饲料。据称，不必

专门设厂，在农场就可实施生产，甚至把家用洗衣机稍作改装做发酵缸，也可得到满意的效果。

(二) 糖类原料

在这类原料发酵中，应用最广泛的微生物是能同化五炭糖的假丝酵母属 Candida。

利用糖蜜、木材水解液为原料生产酵母已有数十年历史，因这些原料价格较高，目前仅限于生产医用酵母、面包酵母等。啤酒厂也回收啤酒酵母做饲料，作为副产品，用这些方法生产酵母的技术已相当成熟，但亦在不断改进中。例如，丹麦的一家工厂经过多年的研究后，建成一个技术和设备新颖、用糖蜜生产面包酵母的工厂，于1973年开工。^[20]原料处理用喷雾灭菌技术，即糖蜜用对流的直接蒸汽加热，温度在不到一秒钟时间内从95°C升温至140~145°C，然后真空膨胀冷却至95°C，这种灭菌法可避免糖蜜的焦糖化，也可避免氨基酸和维生素的破坏。工厂的发酵缸150立方米，是电子—气动控制的。

以生产饲用单细胞蛋白为目的的工厂，多着眼于利用价廉的（如亚硫酸纸浆废液、酒厂废液、乳清、泥炭水解液等）糖质原料。

造纸厂的亚硫酸制浆废液含有较多量由半纤维素水解而得的单糖（用软木原料时主要是甘露糖，用硬木原料时主要是木糖），可以作为发酵原料。用亚硫酸木浆废液为原料，利用其中的五炭糖生产饲料酵母，在国外已有数十年历史了。据七十年代中期统计，世界年产量约为35万吨。^[12]生产方法与其他糖质原料大同小异，但亦不断革新。其中一个较大的革新是芬兰的佩基洛法 Pekilo Process，这个方法是由芬兰制浆造纸研究所从六十年代开始研究的。^[12, 21, 22, 23]该法的特点是不用传统的酵母，经过300个菌株的筛选后采用了线状真菌拟青霉 Paecilomyces rari-