



卡诺拉菜粕 饲料工业指南

猪、家禽、水生和反刍动物研究综述
(第七版)



本指南是加拿大卡诺拉油菜籽协会最新发布的菜粕应用手册。

每隔几年，本指南就会更新一版，以纳入有关卡诺拉菜粕应用的最新研究结果及饲料分析技术的进展。自2019年第6版发布以来，在世界各地不同动物种类和不同环境下做了大量的饲养试验。

本期更新的内容有：

- 预榨浸提和纯压榨卡诺拉菜粕的营养成分及畜禽和水生动物对卡诺拉菜粕养分的消化率
- 卡诺拉菜粕在泌乳早期及泌乳周期对产奶量的影响
- 水生动物种类的研究结果
- 卡诺拉菜粕支持肠道健康的研究数据
- 卡诺拉菜粕对可持续发展的贡献

本指南电子版可以在加拿大油菜籽协会网站 canolacouncil.org 或 canolamazing.com 下载。

感谢以下各位为编写本指南所做出的贡献：

Dr. Essi Evans, E+E Technical Advisory Services

Brittany Wood, Canola Council of Canada

Caroline Traweger, Canola Council of Canada

校译：秦国庆

目录 CONTENTS

第一章 基本介绍	1
第二章 营养成分	5
第三章 卡诺拉菜粕对反刍动物的价值	13
第四章 卡诺拉菜粕对猪的价值	35
第五章 卡诺拉菜粕对家禽的价值	49
第六章 卡诺拉菜粕对水生动物的价值	61

CH.1 INFORMATION

第一章 基本介绍

卡诺拉油菜是加拿大最重要的农作物之一，也是世界上贸易量仅次于大豆的植物性蛋白。土地肥沃的加拿大西部是卡诺拉油菜的主产区。每年初夏，鲜艳的黄色花朵点缀着乡村，西部草原片片金黄，孕育约1800-2000万吨的油菜籽实。微小的圆形籽粒含有大约44%的油分，压榨浸提后成为世界上最健康的食用油之一——芥花油，所余籽实的固体部分富含蛋白质，加工后成为优质的动物饲料原料——卡诺拉菜粕。

卡诺拉油菜(芥花油)的命名是为了区分传统的普通油菜及其菜籽油。卡诺拉油菜是以甘蓝型油菜和芸苔属植物为亲本，采用传统育种技术培育而成的油菜品种，抗营养因子水平低，特别是芥花油中的芥酸含量低于2%，菜粕中硫代葡萄糖苷含量低于30微摩尔/克。在有些国家，特别是欧洲国家，称卡诺拉油菜为“双零油菜”(低芥酸、低硫代葡萄糖苷)，以表征其籽、油、粕的品质。卡诺拉菜粕中的硫代葡萄糖苷微乎其微，动物适口性非常好。





生产与市场

加拿大卡诺拉油菜的产量稳步增长，目前年产约2000万吨。加拿大油菜行业为应对日益增长的世界需求，提出年产能提升到2600万吨的行业目标，将通过持续提高产量、建立消费者对卡诺拉油菜的价值认同，以及达成可靠、畅通的贸易关系等策略来实现。如图1所示，过去20年间卡诺拉产量稳步增长。

全球对卡诺拉菜粕和芥花油的需求持续增长，刺激了行业投资扩增加工能力。从2021到2023年，已有5项重大公告，加拿大将在未来几年本土新增670万吨的加工能力，比目前1100万吨加工能力增加了60%。加工能力扩增将产出额外的菜粕从加拿大出口到美国、中国、印太地区的国家。目前约有一半的菜籽在加拿大本土加工处理，另外一半则出口至其他国家(表1)，进口国主要是为了榨油，获取菜籽最有价值的部分，菜粕则为加工副产品以粕或颗粒状蛋白饲料，广泛用于饲料工业，也以散装形式在市场交易。

加拿大卡诺拉油菜收获面积及产量

Source: Statistics Canada, Table 32-10-0359-01

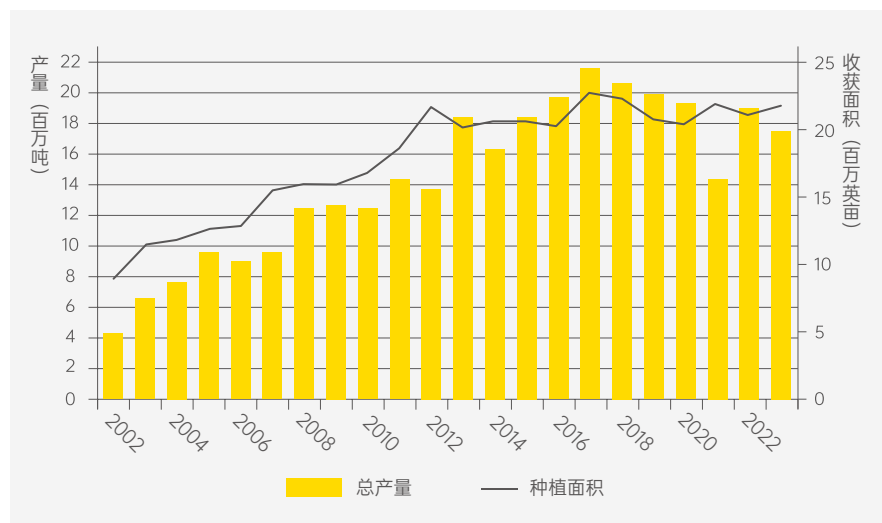


图 1. 2002-2023 年卡诺拉油菜收获面积及产量

加拿大卡诺拉菜粕的贸易规范列于表2。卡诺拉菜粕和普通菜粕在各国都被广泛用于动物饲料，已成为豆粕以外全球贸易量最大的蛋白质饲料。卡诺拉菜粕和普通菜粕的主产地在加拿大、澳大利亚、中国、欧盟和印度。卡诺拉菜粕在动物饲料中的应用，因市场不同而因地制宜。直接出口到美国的卡诺拉菜粕主要用于牛奶生产。在加拿大国内，菜粕基本用于奶牛、猪和家禽饲料。

加拿大的卡诺拉油菜籽出口到许多国家，在当地加工后的菜粕用途多样，用于猪、禽和水生动物饲料。

	自然年度			
	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2022/2023
油菜籽总产量	19,912	19,485	13,757	18,174
出口总量	10,038	10,585	5,248	7,944
中国	1,926	2,714	1,265	4,608
日本	2,140	2,323	1,383	1,101
墨西哥	1,154	1,374	1,035	1,208
阿联酋	989	997	307	169
巴基斯坦	691	660	64	267
欧盟	2,177	1,751	625	215
美国	495	429	537	320
其他国家	467	337	33	56
国内油菜籽加工	10,129	10,425	8,555	9,961
国内菜粕用量	737	625	649	528
菜粕出口总量	4,904	5,261	4,516	5,311
美国	3,466	3,581	2,920	3,484
中国	1,417	1,577	1,587	1,819
其他国家	21	103	9	8

¹ 加拿大统计局

表 1. 加拿大卡诺拉油菜籽、粕产量及国内消耗和出口量 (× 1000 吨)¹

指标(原样)	加拿大、美国	出口
粗蛋白, %	> 36	> 36
脂肪 - 预榨浸提菜粕, 质量 %	> 2	> 2
脂肪 - 纯压榨菜粕, 质量 %	> 10	> 10
水分, 质量 %	< 12	< 12
粗纤维, 质量 %	< 12	< 12
沙粒或石砾, 质量 %	-	< 1

¹ 加拿大油籽加工协会, 2020

表 2. 加拿大卡诺拉菜粕贸易规范 (加拿大油籽加工协会制定)¹

卡诺拉菜粕生产工艺

绝大多数油菜籽采用预榨浸提制油工艺将油和粕分离，其加工过程通常包括以下步骤(图2):

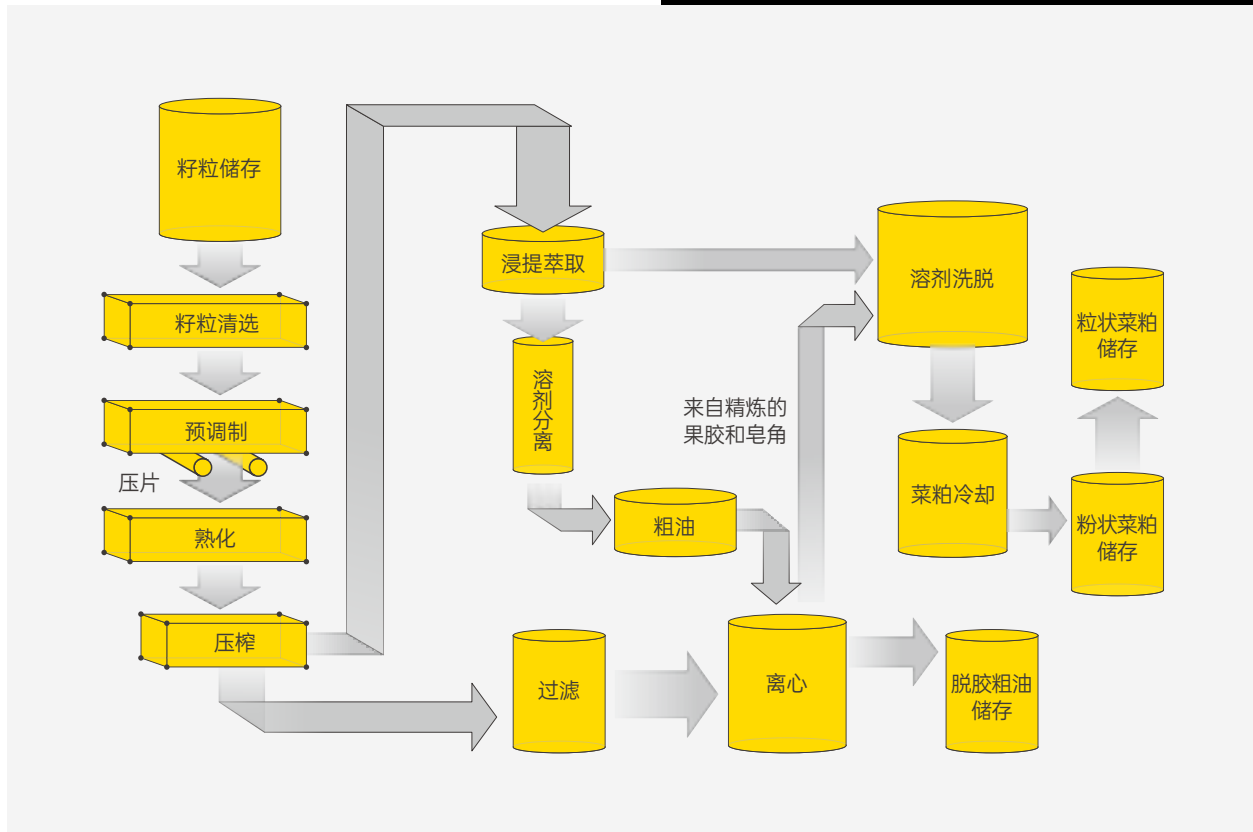


图 2. 预榨浸提工艺示意图

- 籽粒清选
- 籽粒预调制和压片
- 籽粒熟化
- 机械压榨籽粒压片并获取部分油分
- 溶剂萃取并获得剩余油分
- 脱溶剂并烘焙菜粕
- 干燥和冷却菜粕

加拿大境内仅有很少一部分加工厂采用纯压榨工艺，也称为双榨工艺。与预榨浸提工艺比较，纯压榨工艺缺少溶剂萃取、脱溶剂、干燥和冷却步骤，因而菜粕中油分较高，可达8-11%。

加工过程与菜粕品质

榨油厂加工条件的改变会对菜粕品质产生正面或负面的影响。加工过程中应设定黑芥子酶失活的最低温度，否则，未灭活的黑芥子酶在动物消化道内将硫代葡萄糖苷分解，形成具有毒性的代谢物(糖苷配基)。加工过程中的热处理也会使菜粕中30-70%的硫代葡萄糖苷降解(Daun and Adolphe,1997)，但过长时间的高温处理会降低菜粕蛋白质的品质。

加拿大境内榨油厂的加工条件十分相似，不同工厂的菜粕品质没有明显差异。小规模的生产 and 加工可能对温度的控制导致其菜粕品质的变异相对较大。



CH.2 NUTRIENTS

第二章 营养成分

预榨浸提 卡诺拉菜粕的营养成分

来源与化学分析

来源于加拿大的卡诺拉菜粕，是甘蓝型油菜、芸苔属和芥菜属种子经压榨、溶剂萃取后的混合物，绝大部分 (>95%) 是甘蓝型油菜种子预榨浸提的菜粕。与任何其他作物一样，生长期气候条件、收获季节的变化会影响卡诺拉菜粕的养分组成，品种和加工过程也对菜粕养分有些微影响。表1列举了加拿大境内13家加工厂连续7年菜粕样品的测试结果。

¹ Radfar et al., 2017
² Broderick et al, 2016
³ Ross et al., 2013

养分	水分12%	干物质基础
水分, %	12.00	0.00
粗蛋白 (N*6.25), %	36.90	42.00
过瘤胃蛋白, 蛋白质 % (NRC) ²	43.50	43.50
过瘤胃蛋白, 蛋白质 % (CNCPS) ³	53.00	53.00
脂肪, %	2.81	3.20
油酸, %	1.74	1.98
亚油酸, %	0.56	0.64
亚麻酸, %	0.24	0.27
粗灰分, %	6.42	7.30
钙, %	0.67	0.76
磷, %	1.03	1.17
总膳食纤维, %	33.60	38.20
酸性洗涤剂纤维, %	16.30	18.60
中性洗涤剂纤维, %	25.50	29.00
芥子碱, %	0.88	1.00
植酸, %	2.02	2.30
硫代葡萄糖苷, 微摩尔/克	3.14	3.57

表 1. 预榨浸提卡诺拉菜粕的养分组成 (加拿大境内 13 家加工厂连续 7 年调查结果)¹

蛋白质与氨基酸

加拿大卡诺拉菜粕粗蛋白的最低保证值为 36% (基于 12% 水分)，实际上粗蛋白介于 37% 到 40% 之间 (基于 12% 水分)。在贸易中，预榨浸提菜粕的粗蛋白最低保证值为 36% (基于 12% 水分)，由于生长条件等原因，最小保证值允许油菜籽组分随年份出现些微变化。图 1 显示 2000--2022 年天气和土壤条件对加拿大卡诺拉菜粕粗蛋白含量的影响。如图所示，以无油分、12% 水分计，卡诺拉菜粕的粗蛋白含量在 37-42%。

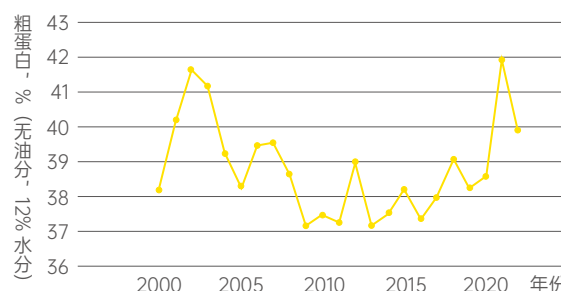


图 1. 2000-2022 年卡诺拉菜粕粗蛋白随年份变化 (加拿大谷物委员会, <https://grainscanada.gc.ca/en/grain-research/grain-harvest-export-quality/canola/2023/>)

卡诺拉菜粕的氨基酸组成非常适合喂养动物。与许多植物性蛋白饲料一样，菜粕中赖氨酸有限，但以蛋氨酸和胱氨酸含量高为人所知，按粗蛋白36%校正后的氨基酸组成可能低于实际值。卡诺拉菜粕中氨基酸含量随蛋白质含量的不同而变化，可以用粗蛋白含量乘以氨基酸占蛋白质的比例来计算(表2)。

氨基酸	%菜粕	%粗蛋白
丙氨酸	1.58	4.38
精氨酸	2.19	6.08
天冬氨酸 + 天冬酰胺	2.49	6.92
谷氨酸 + 谷氨酰胺	6.22	17.28
甘氨酸	1.73	4.81
组氨酸	1.08	3.00
异亮氨酸	1.38	3.84
亮氨酸	2.38	6.60
赖氨酸	2.04	5.66
蛋氨酸	0.69	1.93
蛋氨酸 + 胱氨酸	1.33	3.69
苯丙氨酸	1.34	3.71
脯氨酸	2.49	6.92
丝氨酸	1.32	3.66
苏氨酸	1.43	3.97
色氨酸 ²	0.48	1.33
酪氨酸	0.90	2.51
缬氨酸	1.61	4.46

表 2. 卡诺拉菜粕氨基酸的组成 (粗蛋白 36%、水分 12%)^{1,2}

¹Radfar et al., 2017

²Evonik AminoDat 6.2, 2021

脂肪

其他国家出产的卡诺拉菜粕或普通菜粕，其油分含量约1-2%，而加拿大本地卡诺拉菜粕中油分相对较高，达3.2%(表1)。加拿大的加工厂，一般采用的工艺是将精炼过程中回收的果胶按1-2%回加到菜粕中，而果胶的主要成分是糖脂和磷脂，从而提升了卡诺拉菜粕的能量价值并有助于降尘。

表3列举了芥花油脂肪酸的所有成分。如表所示，饱和脂肪酸只在芥花油中占很小的比例，最多是油酸。卡诺拉菜粕中 Ω -6和 Ω -3的比例为2:1，所以芥花油富含 Ω -3脂肪酸。有些时候，芥花油也添加在动物日粮中以丰富肉、奶、蛋中脂肪酸的种类和比例 (Gallardo, et al., 2012; Gül, et al., 2012; Chelikani, et al., 2004)。

脂肪酸	%脂肪酸
C16:0 棕榈酸	4.5
C16:1 棕榈油酸	0.2
C18:0 硬脂酸	2.4
C18:1 油酸	64.5
C18:2 亚油酸(omega-6)	17.7
C18:3 亚麻酸(omega-3)	8.6
C22:1 芥酸	<0.1
总饱和脂肪酸	7.8
总单不饱和脂肪酸	65.4
总多不饱和脂肪酸	26.3

¹Ghazani and Marangoni, 2013

表 3. 芥花油脂肪酸的组成¹



碳水化合物与纤维

卡诺拉菜粕中碳水化合物的组成相当复杂(表4)。其纤维中大部分为酸性洗涤剂纤维(ADF)和中性洗涤剂纤维(NDF),其NDF比ADF的含量大约高出10%。非纤维成分则为糖类,主要是蔗糖。加工过程中籽粒上的种皮不容易全部除掉,因而卡诺拉菜粕中粗纤维含量高于其他植物性蛋白饲料。

碳水化合物与纤维	12% 水分	干基
非纤维碳水化合物, %		
单糖 (果糖和葡萄糖), %	1.55	1.76
双糖 (蔗糖), %	5.58	6.34
低聚糖, %	2.23	2.53
淀粉, %	0.43	0.49
纤维碳水化合物, %		
酸性洗涤剂纤维, %	16.32	18.55
中性洗涤剂纤维, %	25.51	28.99
总膳食纤维, %	34.53	39.24
淀粉多糖, %	20.15	22.90
纤维素, %	7.65	8.69
非纤维素多糖, %	12.50	14.21
糖蛋白 (中性洗涤剂纤维中不溶性粗蛋白), %	4.30	4.89
木质素和多酚, %	8.68	9.86
木质素, %	5.82	6.61

¹Adewole et al., 2016

²Broderick et al, 2016

³Slominski and Rogiewicz, unpublished

表 4. 卡诺拉菜粕碳水化合物和膳食纤维的组成^{1,2,3}

矿物质

卡诺拉菜粕中矿物质的含量, 大多引用了Bell and Keith(1991)的研究结果, 这些数据为他本人后续的研究再次确认(Bell,et al.1999), 直至最新的调研报告(Broderick,et al., 2016; Adewole et al.,2016) 也确认最初关于卡诺拉菜粕中矿物质的含量。结果指出, 卡诺拉菜粕相较于其他油料饼粕, 也是相对优质的矿物质来源(表5), 特别是硒和磷。与其他植物源性的磷一样, 其中一部分是植酸磷。

矿物质	12%水分	干基
钙, %	0.65	0.74
磷, %	0.99	1.13
植酸磷, %	0.64	0.73
非植酸磷, %	0.35	0.40
钠, %	0.07	0.08
氯, %	0.10	0.11
钾, %	1.13	1.28
硫, %	0.63	0.72
镁, %	0.54	0.61
铜, mg/kg	4.70	5.30
铁, mg/kg	162.00	184.00
锰, mg/kg	58.00	66.00
钼, mg/kg	1.40	1.60
锌, mg/kg	47.00	53.00
硒, mg/kg	1.10	1.30

表 5. 卡诺拉菜粕矿物元素^{1,2,3}

¹Adewole et al., 2016

²Sauvant et al, 2002

³Dairy One (www.dairyone.com)

维生素

卡诺拉菜粕中维生素的信息有限, 一般认为富含胆碱、生物素、叶酸、烟酸、核黄素和硫胺素(NRC 2012)。正如大多数天然来源的饲料原料一样, 不应依赖其提供的维生素养分, 饲料调制时应配合维生素添加剂。表6列举了四个来源的卡诺拉菜粕维生素测定的平均结果(Wickramasuriya et al., 2015)。

维生素	12%水分	干基
生物素, mg/kg	1.08	1.22
胆碱, g/kg	6.7	7.6
叶酸, mg/kg	1.55	1.76
烟酸, mg/kg	160	182
泛酸, mg/kg	9.4	10.6
吡哆醇, mg/kg	7.10	8.10
核黄素, mg/kg	5.80	6.5
硫胺素, mg/kg	5.20	5.9
维生素 E, mg/kg	18.5	21.0

¹Wickramasuriya et al., 2015

表 6. 卡诺拉菜粕中的维生素¹



抗营养因子

普通菜粕中的抗营养因子主要是硫代葡萄糖苷，限制了其在畜禽和水生动物饲料中的添加比例。卡诺拉菜粕源于普通菜粕，但抗营养因子水平很低，也不至于影响动物的生长性能，几乎可饲喂所有畜禽和水生动物

硫代葡萄糖苷

硫代葡萄糖苷是所有十字花科植物常见的一类次生代谢产物，虽然对植物本身没有毒性，但其分解产物对动物生长产生不利影响。相较于普通油菜，卡诺拉油菜中硫代葡萄糖苷非常少，这也是植物育种学家改良油菜品质的结果。

卡诺拉油菜籽中的硫代葡萄糖苷主要是脂肪族和吲哚族两类，其中脂肪族硫代葡萄糖苷约占85%，吲哚族硫代葡萄糖苷约占15% (Adewole et al., 2016)。过去7年连续调查的结果显示，加拿大卡诺拉菜粕硫代葡萄糖苷含量平均3.6微摩尔/克 (Slominski and Rogiewicz, unpublished)，与之相比，普通菜粕硫代葡萄糖苷含量高达120微摩尔/克。硫代葡萄糖苷对动物的影响在分子水平，鉴于脂肪族硫代葡萄糖苷侧链不同，其分子量大小也不同，因而表达硫代葡萄糖苷含量以分子为基础的微摩尔/克比以重量 (mg/kg) 更为精确。

加拿大谷物委员会2023年调查结果显示 (<https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-research/export-quality/oilseeds/canola/2021/08-glucosinolate.html>)，卡诺拉油菜籽中硫代葡萄糖苷水平自2000年以来变化不大，平均值约10微摩尔/克，菜籽经加工处理后残留在菜粕中的硫代葡萄糖苷降低到3.6微摩尔/克。

芥酸

芥酸与心肌病变有关，但加拿大植物学家已成功地将芥花油中芥酸降到几近零 (图2)，无论油或粕，芥酸不再影响芥花油或卡诺拉菜粕的品质。

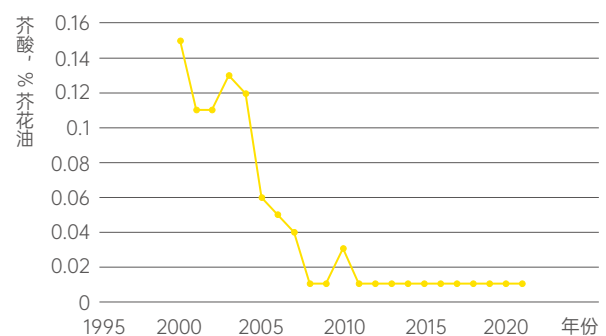


图 2. 2000-2022 年芥花油中芥酸含量
(<https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-research/export-quality/oilseeds/canola/2021/10-fatty-acid-composition.html>).

丹宁

卡诺拉菜粕中丹宁的含量为1.5-3.0%，褐粒品种的单宁含量高于黄粒品种。卡诺拉菜粕中的单宁主要是与种皮相关的不溶性物质，似乎不像其他植物性饲料而影响其适口性和蛋白质消化率 (Khajali and Slominski, 2012)。

纯压榨卡诺拉菜粕的营养成分

为区分溶剂萃取和纯压榨所得的菜粕，产生了一些可交替使用的术语，比如预榨浸提菜粕、纯压榨菜粕和压饼。

目前，加拿大仅有很少量的油菜籽采用纯压榨工艺制油。小型加工厂和生物柴油相关的企业基本采用纯压榨工艺，而不是溶剂萃取；纯压榨工艺只借助机械压力，因而所产菜粕的油分比标准溶剂萃取法所得菜粕的油分高出许多。

纯压榨菜粕的油分含量在8-12%，能量价值较高，其他养分与预榨浸提菜粕的价值相当。表7列出了纯压榨菜粕的营养成分，鉴于油分含量的变异，校正纯压榨菜粕的能值非常必要。与预榨浸提菜粕比较，纯压榨菜粕中油分含量高，但也稀释了其他营养成分。

养分	12% 水分	干基
水分 (实测), %	4.02	0.00
粗蛋白 (N*6.25), %	34.28	38.95
过瘤胃蛋白, % 粗蛋白 (NRC) ²	48.50	48.50
过瘤胃蛋白, % 粗蛋白 (CNCPS) ³	59.10	59.10
脂肪, %	10.96	12.44
油酸, %	6.85	7.75
亚油酸, %	2.20	2.50
亚麻酸, %	0.91	1.03
灰分, %	6.96	7.90
钙, %	0.62	0.71
磷, %	0.96	1.09
总膳食纤维, %	37.07	42.12
酸性洗涤剂纤维, %	16.72	19.00
中性洗涤剂纤维, %	26.83	30.49
硫代葡萄糖苷, 微摩尔/克	8.85	10.06
蛋氨酸, % 粗蛋白	1.93	1.93
赖氨酸, % 粗蛋白	5.93	5.93
苏氨酸, % 粗蛋白	3.69	3.69

¹Adewole et al., 2016

²Broderick et al., 2016

³Ross et al., 2013

表 7. 纯压榨卡诺拉菜粕营养成分¹



卡诺拉油菜籽的营养成分

卡诺拉油菜籽的关键营养指标列于表8，这些数据源自近年来发表的研究文献 (Assadi, et al., 2011; Leterme, et al., 2008)。卡诺拉油菜籽的营养价值也能通过油和粕的成分换算而得，因为籽实的56%为粕而44%为油。能量的估算例外，因为粕和油的能值相加并不能可靠地估计

油菜籽的能量。以猪和禽为例，油菜籽的能量要小于油及菜粕能量的加和，很可能是由于油菜籽并未经过与油和粕同等程度的处理，因而也不能像油和粕那样被动物很好地消化，微粉、膨胀或膨化及热处理油菜籽，可提高油菜籽的能量消化率。

养分	文献			
	Feedipedia, 2018	Assadi et al., 2011	Montoya and Leterme, 2008	DairyOne, 2023
水分, %	6.8	5.0	5.7	5.8
粗蛋白 (N*6.5), %	18.4	20.0	20.7	21.5
脂肪, %	40.5	43.8	38.6	34.5
亚油酸, %	8.3	8.5	7.9	-
亚麻酸, %	4.1	4.2	3.9	-
灰分, %	3.8	3.7	4.1	4.7
粗纤维, %	8.9	-	-	8.9
酸性洗涤剂纤维, %	12.7	-	10.6	15.9
中性洗涤剂纤维, %	17.9	16.6	12.9	22.5
钙, %	0.43	-	-	0.39
磷, %	0.64	-	-	0.65

表 8. 卡诺拉油菜籽的营养成分 (12% 水分)



CH.3 RUMINANTS

第三章

卡诺拉菜粕

对反刍动物的价值

卡诺拉菜粕广泛用于奶牛和肉牛日粮，是反刍动物优选的蛋白饲料，其蛋白品质和氨基酸成分能有效支持反刍动物生长发育和乳品生产。

卡诺拉菜粕在反刍动物日粮的配合比例

日粮或阶段	配合比例
犊牛断奶前	20%, 无调味剂
犊牛断奶后	可达35%, 补充调味剂
犊牛断奶过渡期	无高限
小母牛生长发育期	无高限
奶牛围产期	无高限
奶牛泌乳期	无高限
肉牛生长期	无高限
肉牛育肥期	无高限
山羊泌乳期	无高限
产羔及羔羊生长期	无高限

奶牛

卡诺拉菜粕应用

2021年，加拿大卡诺拉油菜籽协会委托市场调查机构broadhead，经由Farm Journal发出调查问卷，匿名调查显示，营养师对饲料配方最重要的考量先是盈利能力，其次是环境可持续性。

卡诺拉菜粕已成为奶牛日粮常用的饲料原料。营养师发现，配合卡诺拉菜粕很容易平衡日粮氨基酸，并降低粗蛋白水平。最近的研究表明，与其他植物性蛋白质饲料比较，卡诺拉菜粕或芥花油饲喂奶牛能减少温室气体(GHG)排放。

卡诺拉菜粕与盈利能力

尽管大学的研究性试验并不经常观测投入产出，但一些现场试验表明卡诺拉菜粕有助于改善盈利能力。威斯康辛的一个农场试验(表1)，泌乳中期1,295头泌乳奶牛每头每天饲喂3.4公斤卡诺拉菜粕(干物质采食量)，生产数据表明卡诺拉菜粕增加了产奶量并降低了饲料成本，显著改善了投入产出(Faldet, 2018)。

生产性能	对照期	试验期
泌乳奶牛数	1,295	1,295
饲料成本/天, 美元	6.25	6.22
产奶量, 公斤/头/天	41.91	43.95
乳脂率, %	3.86	3.92
乳蛋白, %	3.19	3.29
乳脂, 公斤/头/天	1.67	1.79
乳蛋白, 公斤/头/天	1.43	1.49
3.5% 脂肪校正奶, 公斤/头/天	46.32	49.45
能量校正奶, 公斤/头/天	46.41	49.27

表 1. 威斯康辛牧场饲养试验

加利福尼亚州一项饲养试验，566头泌乳早期奶牛从第3周到23周的生产数据表明，卡诺拉菜粕以较低的饲料成本支持更高的产奶量(Swanepoel et al., 2020)。卡诺拉菜粕是加利福尼亚牧场的主要蛋白质饲料，该试验对照组以卡诺拉菜粕为蛋白质饲料，试验组用豆粕替代日粮中的卡诺拉菜粕，其中豆粕日粮还要补充蛋氨酸(表2)。

配比/生产性能, 天	日粮		
	卡诺拉菜粕	豆粕	豆粕 + 蛋氨酸
卡诺拉菜粕配比 ¹ , % 干基	14.3	6.6	6.6
豆粕配比 ¹ , % 干基	0	6.6	6.6
产奶量, 公斤	51.31	49.55	49.93
乳脂, 公斤	1.78	1.71	1.75
乳蛋白, 公斤	1.45	1.38	1.44
干物质采食量, 公斤	28.5	28.2	28.3
第一次配种受胎率, %	48.9	44.7	48.5
1st + 2nd 配种受胎率, %	68.9	64.2	67.4

¹卡诺拉菜粕 440 美元/吨，豆粕 550 美元/吨。

表 2. 加利福尼亚牧场饲养试验

表2数据显示，豆粕替代卡诺拉菜粕，即使补充了过瘤胃蛋氨酸也导致生产性能下降，但对奶牛健康状况和淘汰率没有明显影响，按当时市场价格核算，卡诺拉菜粕日粮比豆粕及豆粕 + 过瘤胃蛋氨酸日粮的成本分别低5美分和8美分/头/天。



卡诺拉菜粕日粮 减少奶牛温室气体排放

甲烷和一氧化二氮是畜牧生产中最重要的两种温室气体，已多次证明卡诺拉菜粕有助于荷尔斯坦奶牛减少甲烷排放，卡诺拉菜粕日粮能以简单经济的方式减少肠道甲烷和尿液一氧化二氮的排放量。

肠道甲烷产出可以多种方式表达，可以每头奶牛每天的排放量核计，但受体型大小（如娟珊牛和荷尔斯坦牛）、年龄、胎次及产奶性能的影响。也可以单位采食量衡量甲烷产出，这种方法在设定条件下分析总能量损失很有用，

称为甲烷产出率。也用生产单位牛奶或牛肉所排出的甲烷衡量甲烷强度。

表3列举了卡诺拉菜粕替代豆粕对奶牛甲烷产出的影响。文献6是唯一一个以娟珊牛为研究对象的饲养试验，采用间接测热法，日粮配比10.1%卡诺拉菜粕并没有减少甲烷产出(Reynolds et al., 2019)，但能量校正奶平均产量每头每天增加了1公斤，以每头每天甲烷排放量、甲烷产出率和甲烷强度标识，分别减少了5.0%、7.5%和8.6%。

参考文献 ²	蛋白质饲料 ¹			甲烷产出		
	来源	配比,% 干基	ECM ³ ,公斤	克/天	克/公斤 干物质采食量	克/公斤, ECM
1	SBM	17.0	44.0	489	19.0	11.1
	CM	24.0	46.2	461	16.6	10.0
2	SBM	15.0	29.4	461	24.1	17.8
	CM	20.8	30.7	456	22.5	15.8
3	SBM	10.2	32.0	442	17.6	13.8
	CM	13.0	33.1	404	15.7	12.2
4	SBM	13.6	40.3	414	17.0	10.4
	CM	17.1	41.1	396	15.0	9.5
5	SBM	14.5	55.4	538	20.3	9.7
	CM	19.4	55.4	466	18.0	8.4
6	SBM	13.7	31.0	335	19.1	10.8
	CM	10.1	31.7	360	20.5	11.4

¹SBM = 预榨浸提豆粕, CM = 预榨浸提卡诺拉菜粕

²1-Benchaar et al., 2021; 2-Gidlund et al., 2015; 3-Holtshausen et al., 2021;

4-Lage et al., 2021; 5-Moore et al., 2016; 6-Reynolds et al., 2019

³ECM = 能量校正奶

表 3. 卡诺拉菜粕 (CM) 作为主要蛋白质饲料替代豆粕 (SBM) 对甲烷产出的影响

很多因素会影响卡诺拉菜粕日粮减少肠道甲烷气体排放的程度，比如草料来源、草料与精料的比例等，卡诺拉菜粕配合比例也是因素之一。粗蛋白16%的日粮，卡诺拉菜粕配合比例在0-24%，表4显示甲烷产出随卡诺拉菜粕配合比例增加而降低(Benchaar et al., 2021)。

变量	卡诺拉菜粕配合比例, % 干基			
	0	8	16	24
生产性能				
干物质采食量, 公斤	25.8	26.9	27.3	27.7
能量校正奶, 公斤	44.0	45.0	45.6	46.2
甲烷产出				
克/天	489	475	463	461
克/公斤干物质采食量	18.9	17.8	17.1	16.8
克/公斤能量校正奶	12.5	12.0	11.6	11.3

¹ Benchaar et al., 2021

表 4. 日粮卡诺拉菜粕配合比例与甲烷产出¹

干奶牛和小母牛阶段研究数据不多，但从肉牛和体外试验数据可做出一些推论。一项生长育肥期试验以卡诺拉菜粕替代豆粕，甲烷产出减少了27%(Elshareef et al., 2020)，体外发酵结果显示在不同饲养条件下，卡诺拉菜粕减少了甲烷产出 (Paula, et al., 2017; Ramirez-Bribiesca et al., 2018; Soliva et al., 2008)。

卡诺拉菜粕减少的部分肠道甲烷与其脂肪酸组成有关，因为卡诺拉菜粕的脂肪富集油酸，油酸是单不饱和脂肪酸。脂肪以三种作用方式减少肠道甲烷：直接作用于甲烷菌和原生菌，充当氢离子的储存库，供给高浓度的能量；不饱和脂肪酸粘附原生菌细胞膜，抑制原生菌将氢离子转运给甲烷菌(Kobayashi, 2010)；不饱和脂肪酸的生物氢化可能利用部分氢离子，导致更少的氢离子与碳结合产生甲烷。一项荟萃分析显示，奶牛日粮脂肪增加1%，甲烷产出减少2.2%(Eugene et al., 2008)；肉牛日粮脂肪增加1%，甲烷产出减少5.6% (Beauchemin et al., 2008)。

卡诺拉菜粕日粮降低甲烷产出部分与配方中的脂质有关，卡诺拉菜粕日粮配合芥花油、亚麻籽油或葵花籽油都能降低甲烷的产出(Beauchemin et al., 2009)，卡诺拉菜粕在瘤胃发酵产生更多丙酸，导致用于合成甲烷的碳更少，研究人员发现慢降解蛋白与甲烷产出存在高度负相关，卡诺拉菜粕慢降解蛋白与甲烷产出相关系数为-0.99，日粮粗脂肪与甲烷产出的相关系数为-0.80 (Ramirez-

Bribiesca et al., 2018)。丹宁酸同样可以减少甲烷产出，其效果与日粮粗脂肪叠加(Williams et al., 2020)。卡诺拉菜粕中的黑色种皮含有单宁酸。

试验证实卡诺拉菜粕降低了尿液一氧化二氮浓度。两个荟萃分析比较了卡诺拉菜粕与其他植物性蛋白饲料的吸收效率，卡诺拉菜粕蛋白吸收效率高，血液尿素氮低，排出的尿素氮迅速转化为氨气，间接地减少一氧化二氮排入大气 (Martineau et al., 2013; Martineau et al., 2019)。表5显示，随日粮卡诺拉菜粕配比增加，尿素氮排出减少。也有研究发现，卡诺拉菜粕日粮配比芥花油，芥花油配合比例并未改变一氧化二氮的产出(Hristov et al., 2011)。

	卡诺拉菜粕配比, % 干基			
	0	8	16	24
氮摄入, 克/天	679	700	707	718
奶氮, 克/天	210	213	218	222
尿氮, 克/天	35.1	33.4	31.7	31.4
尿氮, % 氮摄入	5.1	4.8	4.5	4.3

表 5. 日粮卡诺拉菜粕配比与尿氮排泄¹

¹ Benchaar et al., 2021



卡诺拉菜粕适口性

卡诺拉菜粕对成年反刍动物适口性很好，近来许多试验用卡诺拉菜粕替代豆粕或玉米酒糟，都观察到奶牛采食量得以维持或增加。一个试验采用拉丁方设计 (Benchaar et al., 2021)，奶牛日粮配比 0、8%、16% 或 24% 的卡诺拉菜粕，逐渐全部替代豆粕，随卡诺拉菜粕配比增加，干物质采食量线性增加，产奶量也随之增加 (表 6)。日粮配比 11.7% 的卡诺拉菜粕以替代 8.7% 的豆粕，观察到干物质采食量增加了 0.5 公斤/头/天 (Broderick and Faciola, 2014)。配比 13.7% 豆粕和 20.8% 卡诺拉菜粕的两种日粮，干物质采食量分别为 23.6 和 24.0 公斤/头/天 (Maxin et al., 2013a)。高产奶牛配方高达 20% 的卡诺拉菜粕替换高蛋白玉米酒糟，采食量并未减少 (Swanepoel et al., 2014)。泌乳早期的 3 个饲养试验用卡诺拉菜粕替代豆粕，都观察到干物质采食量增加了 1 公斤/天 (Moore and Kalscheur, 2016; Gauthier et al., 2019; Kuehnl and Kalscheur, 2021)。预榨浸提菜粕比纯压榨菜粕的适口性好，在北美市场的供应更为普遍，也更为持续稳定 (Heim and Krebs, 2020)。

	日粮			
	0	7.89	15.8	23.7
卡诺拉菜粕配比, %	0	7.89	15.8	23.7
豆粕配比, %	17.0	11.3	5.65	0
干物质采食量, 公斤/天	25.8	26.9	27.3	27.7
能量校正奶, 公斤/天	44.0	45.0	45.6	46.2

¹ Benchaar et al., 2021

表 6. 日粮卡诺拉菜粕配比与干物质采食量¹

卡诺拉菜粕也是架子牛适口性很好的蛋白质饲料。架子牛日粮干物质 15% 或 30% 卡诺拉菜粕替代大麦，采食量增加 (Nair et al., 2014)；在后续的育成期，占日粮干物质 10% 或 20% 的卡诺拉菜粕增加了采食量 (Nair et al., 2015)。对肉牛而言，育成期日粮配比 10% 卡诺拉菜粕，其采食量高于玉米酒糟或小麦酒糟日粮 (Li et al., 2013)，用卡诺拉菜粕替代育成期或育肥期日粮 30% 的大麦，其采食量没有下降，无论预榨浸提卡诺拉菜粕或纯压榨卡诺拉菜粕，其结果类似 (He et al., 2013)。

卡诺拉菜粕作为蛋白质饲料的价值

氨基酸组成

鉴于卡诺拉菜粕理想的氨基酸组成，被认为是植物蛋白饲料的明星。25年前，科学家就证明卡诺拉菜粕的氨基酸组成能满足奶牛的产奶需要(表7)，比其他植物蛋白饲料更能补足瘤胃微生物蛋白(Shingoethe, 1996)。最近的研究结果也支持之前的发现，该研究小组持续研究卡诺拉菜粕氨基酸对泌乳早期奶牛的影响，证明卡诺拉菜粕氨基酸的利用效率更高(Kuehnl and Kalscheur, 2022)。

蛋白质饲料	评分	限制性氨基酸		
		1 st	2 nd	3 rd
瘤胃微生物蛋白	0.78	组氨酸	亮氨酸	缬氨酸
鱼粉	0.75	亮氨酸	色氨酸	异亮氨酸
卡诺拉菜粕	0.68	异亮氨酸	亮氨酸	赖氨酸
棉籽粕	0.46	蛋氨酸	异亮氨酸	赖氨酸
豆粕	0.46	蛋氨酸	缬氨酸	异亮氨酸
葵花粕	0.46	赖氨酸	亮氨酸	蛋氨酸
肉骨粉	0.43	色氨酸	异亮氨酸	蛋氨酸
酒糟	0.40	赖氨酸	蛋氨酸	组氨酸
玉米酒糟	0.32	赖氨酸	色氨酸	蛋氨酸
玉米蛋白粉	0.21	赖氨酸	色氨酸	异亮氨酸
羽毛粉	0.19	组氨酸	蛋氨酸	赖氨酸

¹ Shingoethe, 1996

表 7. 蛋白质饲料乳蛋白评分¹ (1.00= 满分)

自2011年到2014年，卡诺拉油菜籽协会从加拿大各榨油厂收集卡诺拉菜粕样品，康奈尔大学采用罗氏法(Ross et al., 2013)测定了卡诺拉菜粕的氨基酸组成及其在过瘤胃蛋白所占的比例(Ross, 2015)，系统检测结果见表8。

氨基酸	% 干基		% 粗蛋白	
	卡诺拉菜粕	过瘤胃蛋白	卡诺拉菜粕	过瘤胃蛋白
精氨酸	2.17	2.23	6.03	6.19
组氨酸	0.93	0.91	2.56	2.53
异亮氨酸	1.24	1.28	3.44	3.56
亮氨酸	2.52	2.68	7.00	7.44
赖氨酸	1.84	1.76	5.11	4.89
蛋氨酸	1.27	1.55	3.53	4.31
苯丙氨酸	1.44	1.49	4.00	4.14
苏氨酸	1.47	1.51	4.09	4.19
色氨酸	0.48	0.51	1.33	1.42
缬氨酸	1.44	1.54	4.00	4.28

¹ Ross et al., 2015

表 8. 卡诺拉菜粕氨基酸组成及过瘤胃氨基酸成分 - 康奈尔大学罗氏测定法¹



过瘤胃蛋白

卡诺拉菜粕氨基酸组成对反刍动物尤为重要，过瘤胃蛋白的氨基酸成分也是如此。若以过瘤胃蛋白占粗蛋白的比例核计，卡诺拉菜粕的过瘤胃蛋白约占粗蛋白的50%(表9)，比预榨浸提豆粕的过瘤胃蛋白占比高。

参考文献	卡诺拉菜粕	豆粕	卡诺拉菜粕/豆粕
Broderick et al., 2016	46.3	30.5	1.51
Hedqvist and Uden, 2006	56.3	27.0	2.07
Jayasinghe et al., 2014	42.8	31.0	1.38
Maxin et al., 2013	52.5	41.5	1.27
Ross, 2015	53.2	45.2	1.18
Tylutki et al., 2008	41.8	38.3	1.09

表 9. 不同方法测定卡诺拉菜粕和豆粕过瘤胃蛋白占粗蛋白的比例，%

许多饲料数据库关于卡诺拉菜粕过瘤胃蛋白的价值有待更新。过去一直采用原位尼龙袋法测定饲料瘤胃非降解蛋白(RUP)和瘤胃降解蛋白(RDP)，这种方法的疏漏在于假定可溶性蛋白及变成可溶性蛋白而脱离袋膜的部分被瘤胃微生物降解，其氨基酸不能被宿主动物所利用，模糊了蛋白溶解度和降解度的概念，并将之同等对待，以至于新版NASEM (2021) 也没有更新这个观念，饲料蛋白质分配的错误阻碍了营养师估算瘤胃微生物生长的能力，以及估算饲料和微生物蛋白进入肠道的氨基酸。

可溶性蛋白质在瘤胃的降解率是可变的，长期以来也一直被认为是可变的。蛋白质在瘤胃降解会释放氨氮，体外条件下氨、肽和氨基酸都可累积，一些可溶性蛋白质需要打破其二级或三级结构方可水解，如白蛋白或免疫球蛋白具双硫键，或经化学处理有人工交联的蛋白质比排列较少的蛋白质降解更慢(Broderick et al., 1991)。

富有双硫键的蛋白质可溶，在瘤胃很难降解(Wallace, 1983; McNabb et al., 1994)。卡诺拉菜粕两种主要的蛋白质分别是菜籽白蛋白和十字花科球蛋白(Perera et al., 2016)，在一系列条件下，这两种蛋白都可变成可溶性蛋白(Chmielewska et al., 2020)，卡诺拉菜粕的菜籽蛋白含有双硫键，很可能在瘤胃变成可溶性蛋白，这部分可溶性蛋白比其他常见植物蛋白的降解率低。

植物蛋白饲料	可溶蛋白/粗蛋白 %	降解速率, 降解蛋白 %/小时
卡诺拉菜粕(普通菜粕)	20.4	19
亚麻籽粕	58.6	18
羽扇豆	80.2	34
豌豆	77.8	39
豆粕	16.9	46
小麦酒糟	24.3	62

¹Hedqvist and Uden, 2008

表 10. 植物饲料可溶性蛋白瘤胃降解速率¹

表10列举了可溶蛋白在瘤胃的降解速率，卡诺拉菜粕可溶蛋白比豆粕或小麦酒糟可溶蛋白在瘤胃降解的速率慢得多，意味着更多的卡诺拉菜粕可溶蛋白随胃液流入肠道，其流转速率起码比固体食糜快两倍(Seo et al., 2006)，这一事实也许可以矫正原位分析法悬浮于瘤胃变成可溶蛋白的模糊表述。

瘤胃微生物蛋白

研究证实，卡诺拉菜粕与豆粕瘤胃微生物蛋白产出相当。采用直接测定真胃氮流量的方法，卡诺拉菜粕替代豆粕后，瘤胃微生物蛋白产量与替代前没有差别(Brito et al., 2007; Paula et al., 2018)；采用尿嘧啶衍生物估计瘤胃蛋白产量的方法，两个饲养试验都证明卡诺拉菜粕和豆粕没有差别(Lage et al., 2021; Pereira et al., 2020)；Swanepoel 等(2021)沿用此法，测得卡诺拉菜粕改善了瘤胃环境，促进了瘤胃微生物生长。Paula等(2017)采用

双流发酵法，再次确认豆粕与卡诺拉菜粕的瘤胃微生物蛋白产量没有差异。

另外一个试验用卡诺拉菜粕替代大麦，随卡诺拉菜粕配比增加而瘤胃微生物生长减缓。增加热处理卡诺拉菜粕配比导致瘤胃逸出蛋白更多，瘤胃微生物蛋白更少(Krizsan et al., 2017)。然而，热处理卡诺拉菜粕取代大麦，改变了支持瘤胃微生物生长所需的可用淀粉。

能量

与其他精饲料一样，卡诺拉菜粕也是很好的能量饲料，为微生物生长供应养分，支持动物生产。过去一直低估卡诺拉菜粕的能量(NRC, 2001; NRC, 2015)，在许多出版物中仍然存在错误，几个流行的配方软件都用木质素折扣细胞壁的消化率。例如2001版NRC估计的无效中性洗涤剂纤维(NDF)为65%，有效中性洗涤剂纤维为35%，依据流过率估计的实际可消化成分更少。依据改良的方法测定不可消化NDF的结果显示，卡诺拉菜粕无效NDF只占总NDF的32%，如果在瘤胃消化120小时，可消化细胞壁达68% (Cotanch et al., 2014)。潜在的可消化细胞壁在消化完成之前就离开了瘤胃，实际消化率比这个估计值低。新版NASEM (2021)采用48小时NDF消化率测定，其结果更准确、客观和真实。

基于加拿大境内12家榨油厂连续4年收集的144个样品，采用瘤胃88小时NDF消化率测定，卡诺拉菜粕NDF消化率达80.2%，并估计3倍维持采食量时NDF消化率为60.2% (Paula et al., 2017)。后续研究发现，在3倍维持采食量情况下，计算的卡诺拉菜粕泌乳净能(NE-L)是1.87兆卡/公斤(Arce-Cordero et al., 2021)。

这些结果佐证了早期的一些研究，证实泌乳奶牛实际上可以消化大约一半的NDF(Mustafa et al., 1996, 1997)，绵羊(Hentz et al., 2012)和肉牛(Patterson et al., 1999a)消化的NDF比例更高。

育肥场的试验证明，预榨浸提卡诺拉菜粕用于肉牛维持和增重的净能与大麦相同(Nair et al., 2015)，可以取代配方中15%和30%的大麦。一个试验对比了酒糟、高蛋白酒糟、豆粕及卡诺拉菜粕四种蛋白质饲料饲喂奶牛的效果，单位干物质的能量校正奶和体况评分没有变化(Christen et al., 2010)。加州牧场的饲养试验配比20%卡诺拉菜粕并取代高蛋白玉米酒糟，也没有观察到干物质采食量和体况变化(Swanepoel et al., 2014)。卡诺拉菜粕日粮的牛奶能量也高，说明卡诺拉菜粕的能量至少比高蛋白酒糟高。有关卡诺拉菜粕的能量测定结果列于表11。

能量	卡诺拉加工工艺	
	预榨浸提	纯压榨
可消化养分, %	68.2	74.6
消化能, 兆卡/公斤	3.35	3.70
代谢能, 兆卡/公斤	2.70	3.01
3倍维持泌乳净能, 兆卡/公斤	1.78	2.01
维持净能, 兆卡/公斤	1.92	2.16
增重净能, 兆卡/公斤	1.27	1.47

表 11. 预榨浸提和纯压榨卡诺拉菜粕能量平均值



脂肪酸

卡诺拉菜粕可能比其他油籽粕的脂肪含量高，其脂肪主要是油酸(C18:1)，一种单不饱和脂肪酸，这种脂肪也提高了卡诺拉菜粕的能量价值。

不饱和脂肪酸在瘤胃可能使生物氢化的中间体累积，干扰乳脂合成，降低乳脂率。油酸是单不饱和脂肪酸，与其他有两个或两个以上不饱和键的脂肪酸相比，不太可能产生导致乳脂率下降的氢化中间体。一个荟萃分析比较了油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)和亚麻酸(C18:3)对乳脂率的影响，亚油酸(C18:2)降低乳脂率的可能性是油酸和亚麻酸的两倍(Dorea and Armentano, 2017)。与亚油酸含量高的籽粕比较，油酸含量高的籽粕可能会增加牛奶乳脂率和乳脂量，以及牛奶中油酸的浓度(Lopes et al., 2017)。

泌乳奶牛日粮分别大量添加油酸、亚油酸和亚麻酸，添加量达干物质的5%，考察三种脂肪酸对乳脂率和乳脂量的影响，采食5%油酸或亚麻酸的奶牛乳脂量由1.14降到1.02公斤/头/天，采食5%亚油酸的奶牛乳脂量由1.14降到0.86公斤/头/天(He and Armentano, 2011)，后续的

试验也证明亚油酸比油酸对乳脂量的影响更甚(He et al., 2012)。为奶牛供应脂肪酸组成不同的试验日粮，但所添加脂肪的来源、水平与实际饲喂情况相当，不同日粮对乳脂率和乳脂量的影响截然不同，高油酸日粮的乳脂量为1.44公斤/头/天，而高亚油酸日粮的乳脂量为1.31公斤/头/天，低脂肪对照组日粮的乳脂量为1.41公斤/头/天，表明油酸水平较高的日粮不会影响乳脂量(Stoffel et al., 2015)。

此外，常见不饱和脂肪酸如油酸、亚油酸和亚麻酸会打破细胞膜稳定性，增加细胞膜通透性，干扰微生物代谢(Yoon et al., 2018)，其影响随双键数目增加而显现(C18:3>C18:2>C18:1)。

也有一些数据反映随油酸增加，养分瘤胃消化率提高，在泌乳后期奶牛日粮配比6.5%芥花油(含62%油酸)，养分瘤胃消化率得以改善(表12)，包括干物质和中性洗涤剂纤维(Prom and Lock, 2021)。

	处理	
	对照	芥花油
干物质采食量, 公斤/天	14.0	14.5
脂肪酸摄入, 克/天	244	1,154
	瘤胃消化率, %	
干物质	42.3	45.1
有机质	45.5	48.5
粗蛋白	24.1	37.1
中性洗涤剂纤维	43.3	50.6
酸性洗涤剂纤维	34.7	44.2

¹Chilikani et al., 2004

表 12. 奶牛日粮添加芥花油对养分瘤胃消化率的影响¹

已证明油酸的生物氢化速率低于更饱和的脂肪酸(Baldin et al., 2018)，意味着更多的油酸能逸出瘤胃进入肠道，亲和并增益肠道环境，提高养分消化率(Prom et al., 2021)。一项饲养试验对比两种不同脂肪酸组成的豆粕日粮对全消化道消化率的影响，一种豆粕日粮含亚油酸，另一种遗传改良的豆粕日粮含油酸，发现含油酸豆粕日粮的全消化道消化率比含亚油酸豆粕日粮高(Lopes et al., 2017)；另一个实验将油酸注入真胃，也提高了养分消化率(Prom et al., 2018)。

微量营养素

磷

卡诺拉菜粕富含磷，且大部分是植酸磷。与单胃动物不同，植酸磷适用于反刍动物，因为瘤胃中存在快速降解植酸盐的细菌植酸酶(Spears, 2003)，事实证明植酸磷比非植酸磷更容易被反刍动物所利用。一个试验在奶牛日粮总磷有一半是植酸磷，磷的总体消化率为49%，而植酸磷的消化率为79% (Garikipati, 2004)。也有试验发现，10周龄小牛对磷的消化率是72%，其中97%的植酸磷可消化 (Skrivanova et al., 2004)。

碘

碘一直被作为矿物质添加于饲料，部分被用于对抗引发蹄病和乳腺炎的原微生物，奶牛日粮中高浓度的碘也会流落到牛奶，所以人们对牛奶碘的浓度也很关注。

卡诺拉油菜或普通油菜等十字花科植物含有硫代葡萄糖苷，可减少甲状腺和乳腺对碘的吸收(Flachowsky et al., 2014)，尽管现今卡诺拉菜粕的硫代葡萄糖苷极其微量，仍有研究显示这种蛋白质饲料摄入较多会降低牛奶碘的浓度 (Vesely et al., 2009; Troan et al., 2018)；若在奶牛日粮配比0、6、14或20%纯压榨普通菜粕，日粮硫代葡萄糖苷1.07微摩尔/克，日粮中的碘分别有25、19、13和10%转移到牛奶中(Troan et al., 2018)。若奶牛日粮配比13.9%卡诺拉菜粕(表13)，日粮碘的浓度为2.0mg/kg，其牛奶碘的浓度与日粮碘浓度0.5mg/kg无卡诺拉菜粕的牛奶碘浓度相当(Weiss et al., 2015)，卡诺拉菜粕日粮血液碘的浓度较高，利于发挥碘的生物效能，也可保持牛奶碘的浓度在可接受的范围。

	日粮碘浓度, mg/kg 干基					
	0.5			2.0		
卡诺拉菜粕, % 干基	0	3.9	13.9	0	3.9	13.9
血液碘浓度, ug/L	99	142	148	175	251	320
牛奶碘浓度, ug/L	358	289	169	733	524	408

¹Weiss et al., 2015

表 13. 卡诺拉菜粕日粮对血液和牛奶碘浓度的影响¹

日粮阴阳离子差

日粮阴阳离子差(DCAD)可以计算日粮主要阴离子(硫和氯)与阳离子(钠和钾)的差别，两者分子量等值时，日粮呈中性。

最好在干奶期有过量的阴离子，这有利于降低产犊时乳热发生的概率。泌乳开始时血钙的突然流失必须通过大量吸收或动员骨骼钙来补充，阴阳离子负差的日粮被证明有助于骨骼钙释放，有助于维持血钙水平(Wu et al., 2008; Zimpel et al., 2021)。

日粮阴离子或阳离子通常来源于饲料原料或矿物质，饲料原料通常含大量阳离子，为平衡离子差往往会添加阴离子盐，导致日粮适口性差，采食量下降。如表14所示，卡诺拉菜粕本身阴阳离子负差，有助于减少日粮对阴离子盐的需要。

饲料	阳离子		阴离子		离子差
	钾	钠	氯	硫	
卡诺拉菜粕	361	30	-11	-456	-76
玉米	107	9	-23	-63	31
玉米酒糟	281	130	-28	-275	109
豆粕	775	13	-155	-244	389
苜蓿青贮	775	13	-155	-188	445
大麦青贮	621	58	106	106	369
玉米青贮	307	4	-82	-88	142
牧草青贮	795	22	-181	-131	505

表 14. 常见饲料原料阳离子(钾和钠)与阴离子(氯和硫)差¹, mEq/kg 干物质

¹Erdman and Iwaniuk, 2015



抗氧化剂

氧化应激常见于过渡期和热应激期间，卡诺拉菜粕含有多种抗氧化剂，包括多酚(Vuorela et al., 2004; Wanasundara et al., 1995)、维生素E和类胡萝卜素(Loganes et al., 2016)，有助于减少氧化自由基及其伴随的细胞损伤。

预榨浸提卡诺拉菜粕饲喂奶牛

荟萃分析

自2011年以来，就卡诺拉菜粕与豆粕等其他植物蛋白饲料饲喂奶牛已有5个深度荟萃分析，尽管其研究目的和提取数据的方法各有不同，但所有调查都支持这样的事实，即卡诺拉菜粕过瘤胃蛋白高、氨基酸组成很特别。

Huhtanen等(2011)评估了122项研究的结果，在所有试验条件下，保持草料配比不变，日粮配比的蛋白质代替谷物，且蛋白质来源只有豆粕或卡诺拉菜粕。分析显示，粗蛋白消耗每增加1公斤，卡诺拉菜粕和豆粕使牛奶产量分别增加3.4公斤和2.1公斤。研究人员得出结论，与豆粕相比，卡诺拉菜粕的价值被低估了，这份报告的主要数据归纳列于表15。

变量	卡诺拉菜粕	豆粕
干物质采食量, 公斤/天	19.4	16.8
产奶量, 公斤/天	27.2	23.6
能量校正奶产量, 公斤/天	28.6	23.6

¹ Huhtanen et al., 2011

表 15. 荟萃分析结果¹

变量	原始平均差
干物质采食量, 公斤/天	0.22
产奶量, 公斤/天	0.69
乳蛋白产量, 公斤/天	0.02
牛奶尿素氮, mg/dL	-0.98
牛奶尿素氮/氮摄入, %	0.22

¹ Moura et al., 2018

表 16. 荟萃分析结果¹

Martineau等(2013)采用不同的数据提取方法，采信了27个公开发表的研究报告，评估了88个处理，比较卡诺拉菜粕等量替代其他植物饲料粗蛋白对奶牛生产的影响，卡诺拉菜粕平均饲喂量2.3公斤/头/天，产奶量增加了1.4公斤/头/天。

延续之前的研究分析，Martineau等(2014)分析饲料蛋白质来源与血液氨基酸的响应，采信10个饲养试验和21个处理的数据，证明卡诺拉菜粕日粮提高了血液必需氨基酸浓度，降低了牛奶尿素氮水平。这些差异确实反映了卡诺拉菜粕氨基酸组成的重要性，因为它与泌乳奶牛的需求有关。该报告的结论是卡诺拉菜粕提高了必需氨基酸的有效性

Moura等(2018)收集了37篇研究报告的数据，评估卡诺拉菜粕替代其他植物蛋白的效果，对比各处理的不同效应，其结果归纳列于表16，所列数值在统计意义上达到显著水平。

为纳入最新的研究数据，Martineau等(2019)做了最后一次荟萃分析，比对奶牛日粮部分或全部粗蛋白来源于卡诺拉菜粕及与其他植物蛋白的饲养效果。有些数据显示，卡诺拉菜粕蛋白与其他非卡诺拉蛋白饲料混合能提高非卡诺拉蛋白饲料的价值，但不清楚非卡诺拉蛋白饲料能否提高卡诺拉菜粕的价值。这项综合研究表明，将其他植物蛋白与卡诺拉菜粕混合不会提高牛奶产量；卡诺拉菜粕可以在日粮干物质配比达19%，这是在整理数据时测试的最高配比，牛奶产量并未降低，对采食量也没有负面影响。



泌乳早期

直到最近才评估了卡诺拉菜粕在泌乳早期的效果。自2016年以来，已有4项研究支持在泌乳早期奶牛日粮中使用卡诺拉菜粕(表17)。所有试验均表明，在泌乳早期饲喂卡诺拉菜粕的奶牛产奶量更高，卡诺拉菜粕和豆粕两种蛋白质的饲料效率相当，卡诺拉菜粕日粮有明显优势，其中有一个例外(Moore and Kalscheur, 2016)。

试验 ²	试验期/周	配合比例, %干物质		产奶量, 公斤		ECM/DMI ¹	
		卡诺拉菜粕	豆粕	卡诺拉菜粕	豆粕	卡诺拉菜粕	豆粕
1	16	19.4	14.5	56.5	52.3	2.31	2.17
1	16	11.9	8.9	54.8	50.1	2.22	2.16
2	22	13.0	7.0	44.5	42.3	1.53	1.50
3 ³	22	14.3	6.3	51.3	49.6	1.79	1.73
3	22	14.3	6.3	51.3	49.9	1.79	1.77
4	16	16.5	12.1	52.8	50.9	2.18	2.13

表 17. 卡诺拉菜粕或豆粕日粮对泌乳早期产奶性能的影响

¹ ECM/DMI= 能量校正奶/干物质采食量

² 1: Moore and Kalscheur, 2016; 2: Gauthier et al., 2019; 3: Swanepoel et al., 2020; 4: Kuehnl and Kalscheur, 2021

³ 两个豆粕日粮都配比6.5%卡诺拉菜粕，第二个豆粕日粮还补充了蛋氨酸。

两个农场大群体饲养试验显示，卡诺拉菜粕和豆粕日粮的饲料效率相当，但饲喂卡诺拉菜粕日粮的奶牛体况损失更小(Gauthier et al., 2019; Swanepoel et al., 2020)。

泌乳中期

表18和表19归类了卡诺拉菜粕与其他植物蛋白一对一饲养试验的结果，大部分试验只涉及豆粕（表18），也有其他植物蛋白（表19）。如表所示，大多数报告认为卡诺拉菜粕的产奶潜力比豆粕更好，最起码与其他替代性植物蛋白相当。

文献	蛋白原料		差别
	卡诺拉菜粕	豆粕	
Benchaar et al., 2021	42.2	40.4	1.8
Brito and Broderick, 2007	41.1	40.0	1.1
Broderick et al., 2012	40.7	39.7	1.0
Broderick et al., 2015	39.5	38.5	1.0
Broderick and Faciola, 2014	38.8	38.2	0.6
Christen et al., 2010	31.7	31.7	0
Galindo et al., 2017	46.0	43.7	2.3
Gauthier et al., 2019	44.5	42.3	2.2
Gauthier et al., 2019	44.5	44.8	-0.3
Gidlund et al., 2015	30.2	29.5	0.7
Holtshausen et al., 2021	34.2	35.0	-0.8
Kuehnl and Kalscheur, 2021	52.8	50.9	1.9
Kuehnl and Kalscheur, 2022	44.3	41.4	2.9
Lage et al., 2021	43.8	41.1	2.7
Maxin et al., 2013	30.9	31.9	-1.0
Moore and Kalscheur, 2016	55.7	51.2	4.5
Paula et al., 2015	40.3	39.4	0.9
Paula et al., 2018	44.1	42.9	1.2
Paula et al., 2020	37.2	36.4	0.8
Sanchez-Duarte et al., 2019	38.2	37.5	0.7
Swanepoel et al., 2020	51.3	49.6	1.7
Swanepoel et al., 2020	51.3	49.9	1.4
Weiss et al., 2015	39.4	37.6	1.8

表 18. 豆粕或卡诺拉菜粕蛋白对产奶量的影响，公斤 / 头 / 天

文献	蛋白饲料		差别
	卡诺拉菜粕	棉籽粕	
Brito and Broderick, 2007	41.1	40.5	0.6
Maesoomi et al., 2006	28.0	27.0	1.0
	卡诺拉菜粕	玉米酒糟	
Acharya et al., 2015	34.9	35.5	-0.6
Christen et al., 2010	31.7	31.2	0.5
Maxin et al., 2013	30.9	32.2	-1.3
Mulrooney et al., 2009	35.2	34.3	0.9
Swanepoel et al., 2014	47.9	44.9	3.0
	卡诺拉菜粕	小麦酒糟	
Abeyssekara and Mutsvangwa, 2016	40.4	40.2	0.2
Chibisa et al., 2012	45.0	45.0	0
Maxin et al., 2013	30.9	30.8	0.1
Mutsvangwa et al., 2016	43.4	42.4	1.0
	卡诺拉菜粕	葵花粕	
Beauchemin et al., 2009	27.0	26.7	0.3
Vincent et al., 1990	26.7	25.1	1.6
	卡诺拉菜粕	啤酒糟	
Moate et al., 2011	23.4	22.3	1.1
	卡诺拉菜粕	亚麻籽粕	
Beauchemin et al., 2009	27.0	26.8	0.2
	卡诺拉菜粕	普通菜粕	
Hristov et al., 2011	47.1	45.0	2.1
	卡诺拉菜粕	纯压榨豆粕	
Lage et al., 2021	43.8	42.6	1.2

表 19. 卡诺拉菜粕或其他植物蛋白对产奶量的影响, 公斤 / 头 / 天



卡诺拉菜粕饲喂生长期后备牛

断奶前犊牛

尽管卡诺拉菜粕的养分价值适合犊牛，但早期的研究一般不太可能在小牛日粮中配比卡诺拉菜粕，因为高硫代葡萄糖苷水平会影响采食量。Ravichandiran等(2008)考察了不同水平硫代葡萄糖苷卡诺拉菜粕和普通菜粕对5月龄小牛的影响。饲喂低于20微摩尔/克硫代葡萄糖苷的卡诺拉菜粕与非卡诺拉菜粕日粮的采食量几乎相同，分别为1.10公斤和1.08公斤/天，而饲喂高硫代葡萄糖苷普通菜粕(>100微摩尔/克)的小牛，其采食量仅0.76公斤/天。值得注意的是，加拿大的卡诺拉菜粕以干物质计仅有3.57微摩尔/克硫代葡萄糖苷。

犊牛年龄可能是影响接受度的一个因素。在断奶前(表20)和断奶后(表21)对小牛做了两个类似的饲养试验，两者都注意到断奶前采食量减少的趋势(表20)，但断奶后采食量没有立即减少(表21)。Miller-Cushon等(2014)建议对开食料制粒，以避免小牛挑食。

Claypool et al., 1985	日粮		
	卡诺拉菜粕	棉籽粕	豆粕
蛋白质饲料, % 干基	17.6	14.1	11.1
断奶前采食量 ¹ , 克/天	368	479	439
平均日增重, 克/天	580	620	620
Hadam et al., 2016	卡诺拉菜粕	卡诺拉菜粕/豆粕	豆粕
蛋白质饲料, % 干基	35.0	16.5	24.0
断奶前采食量 ² , 克/天	269	250	315
平均日增重, 克/天	587	636	684

表 20. 卡诺拉菜粕用于断奶前犊牛料

Claypool et al., 1985	日粮		
	卡诺拉菜粕	棉籽粕	豆粕
蛋白质饲料, % 干基	17.6	14.1	11.1
断奶后采食量 ¹ , 克/天	-	-	-
平均日增重, 克/天	890	890	910
Hadam et al., 2016	卡诺拉菜粕	卡诺拉菜粕/豆粕	豆粕
蛋白质饲料, % 干基	35.0	16.5/12.5	24.0
断奶后采食量 ² , 克/天	2,001	1,964	2,003
平均日增重, 克/天	734	745	798

表 21. 卡诺拉菜粕用于断奶后犊牛料

¹犊牛8周龄断奶

²犊牛5-7周龄断奶，表中所列为5周龄前数据

¹犊牛在8周龄断奶，试验期末16周龄，犊牛群养未统计采食量

²犊牛5-7周龄断奶，表中所列为5-8周龄数据

Gorka和Penner(2020)审核了一系列研究，其中添加甜味剂(甘油或糖蜜)对配比卡诺拉菜粕的犊牛开食料采食量有积极影响，研究人员建议将卡诺拉菜粕在犊牛料的配比限制在20%以下。在后续研究中，卡诺拉菜粕取代犊牛料中0、15、30、45或60%的豆粕，数据显示平均日增重或饲料效率在各处理间没有显著差异，卡诺拉菜粕在犊牛料中配比不超过20.7%。作者认为卡诺拉菜粕可以替代犊牛料中高达60%的豆粕(Burakowska et al., 2021)。

卡诺拉菜粕确实可以支持犊牛断奶前的最佳生长，前提是适口性良好。萨斯喀彻温大学最近的研究表明，可以用甜味剂或其他调味剂掩盖味道来克服厌食卡诺拉

菜粕(Gorka and Penner, 2020)，或者将卡诺拉菜粕配比限制在20%以下。Burakowska等(2020)发现，犊牛开食料配比34%卡诺拉菜粕并添加5%甘油时，采食量由243克/天增加到338克/天。当卡诺拉菜粕被用作犊牛料的主要蛋白质来源时，制粒也可以提高卡诺拉菜粕的接受度(Burakowska et al., 2021b)，在犊牛8-42日龄配比35%卡诺拉菜粕并添加甜味剂，犊牛采食量也未减少(Burakowska et al., 2017)。还有一项研究(Burakowska et al., 2021a)显示，在不加糖日粮中配比0-20.7%卡诺拉菜粕，犊牛的生长速度、饲料效率、瘤胃发酵以及血糖和胰岛素水平没有差异(表22)。

变量	处理(取代豆粕比例, %)				
	0	15	30	45	60
卡诺拉菜粕配比, % 干物质	0	5.2	10.4	15.7	20.7
豆粕, % 干物质	28.4	24.1	19.8	15.7	11.4
平均日增重, 公斤	0.91	0.93	0.90	0.87	0.86
饲料效率	0.54	0.54	0.53	0.53	0.55
瘤胃挥发性脂肪酸浓度, mM	118	133	111	132	128
瘤胃氨浓度, mg/dL	4.0	3.0	3.4	5.0	3.4
血液葡萄糖浓度, mg/dL	62.7	61.1	61.8	58.8	61.8
血液胰岛素浓度, µg/L	0.62	0.54	0.44	0.41	0.68

¹Burakowska et al., 2021a

表 22. 卡诺拉菜粕在 8-62 日龄犊牛料的配比和效率¹

Melendez等(2020)在犊牛开食料配合纯压榨卡诺拉菜粕和纯压榨亚麻籽粕，两种蛋白质饲料占日粮干物质25%，从犊牛初生到60日龄，平均采食量0.5公斤/头/天，其他生长性能没有差别。

断奶过渡期犊牛

目前只有3个卡诺拉菜粕在犊牛断奶过渡期的饲养试验，当时都对卡诺拉菜粕配比几乎没有关注，表23归纳了这些试验结果。

文献	变量	豆粕	卡诺拉菜粕
Claypool et al., 1985	配比, % 干物质	11.1	17.6
	干物质采食量, 克/天	-	-
	平均增重, 克/天	910	890
Hadam et al., 2016	配比, % 干物质	24.0	35.0
	干物质采食量, 克/天	2,003	2,001
	平均增重, 克/天	796	734
Burakowska et al., 2021	配比, % 干物质	24.0	35.0
	干物质采食量, 克/天	1,581	1,628
	平均增重, 克/天	783	671

表 23. 犊牛断奶过渡期饲喂卡诺拉菜粕效果评估



生长期小母牛

卡诺拉菜粕在生长期小母牛和肉犊牛日粮配比不受限制。Anderson 和 Schoonmaker (2004)将卡诺拉菜粕与豆类(豌豆、鹰嘴豆和小扁豆)作为断奶后犊牛的蛋白质,日粮粗蛋白为16%,饲喂卡诺拉菜粕日粮的小牛增重略少(1.67比1.89公斤/天),但配比9.4%卡诺拉菜粕日粮的饲料效率高(4.1比3.8)。在一项奶犊牛研究中, Terre 和 Bach (2014)评估了粗蛋白18%的开食料,其粗蛋白主要来源于卡诺拉菜粕或豆粕,数据显示两种开食料的采食量和增重率基本相当,研究人员认为断奶后日粮配比卡诺拉菜粕不需要添加调味剂。为保证消化率和氮存留不至于下降,玉米酒糟只能部分替代12月龄生长期小母牛日粮中的卡诺拉菜粕(Suarez-Mena et al., 2015)。

与卡诺拉菜粕不同,豆粕含有高浓度的植物雌激素,可以模仿雌激素的作用而改变荷尔蒙周期(Woclawek-Potocka et al., 2005; Cools et al., 2014)。Gordon等(2012)

给8-24周龄小母牛分别饲喂卡诺拉菜粕或豆粕日粮,60周龄配种并转喂普通日粮,生长期饲喂卡诺拉菜粕的小母牛妊娠率为66.7%,而同期饲喂豆粕日粮的小母牛妊娠率仅为41.7%。如果出现配种妊娠困难,植物雌激素含量低的蛋白质饲料,例如卡诺拉菜粕有替代优势。

中国的饲养试验

中国乳业一直创新和稳步发展,随之是对可靠蛋白质饲料的需求。有鉴于此,加拿大卡诺拉油菜籽协会于2011年在中国展开了多项示范试验,所有饲养试验都在管理良好的牧场进行,平均产奶量为35升,只有1个牧场例外,平均产奶量25升。表24归纳了试验结果,日粮中卡诺拉菜粕配合比例相当低,但卡诺拉菜粕取代高价蛋白质成分后,牛奶产量增加或保持不变。

卡诺拉菜粕与肠道发育和健康

在一项涉及美国13个州104个牧场的研究中,Urie等(2018)检测到发病率和死亡率分别为33.9%和5%,发病的个体约有一半与肠道消化有关。卡诺拉菜粕有助于改善犊牛肠道健康。

在萨斯喀彻温大学精心设计的饲养试验中,Burakowska等(2021b)给小牛饲喂24%豆粕或35%卡诺拉菜粕等氮日粮,小牛在52日龄断奶,72日龄屠宰,观察到瘤胃发育在两组等氮日粮间没有差异,若以组织脱落或分离度量肠道损伤程度,饲喂卡诺拉菜粕的小牛其损伤指数较低。开食料配比卡诺拉菜粕增加了真胃和空肠组织重量(Burakowska et al., 2021b)。

后续试验给犊牛日粮配比从0到20.7%的卡诺拉菜粕,随日粮卡诺拉菜粕配比增加,瘤胃乙酸水平有下降趋势,瘤胃丙酸浓度呈上升趋势。

一项纯压榨卡诺拉菜粕和纯压榨亚麻籽粕的饲养试验,发现饲喂卡诺拉菜粕的犊牛腹泻率25%,其血浆触珠蛋白(一种急性期蛋白)水平也较低,而饲喂纯压榨亚麻籽粕的犊牛腹泻率为45%(Melendez et al., 2020)。

地点	详情	产奶量变化,升
牧场1	奶牛352头,交叉试验,直接替代豆粕,1.7公斤/头/天	-0.2
牧场2	奶牛325头,交叉试验,直接替代豆粕,1.0公斤/头/天	+0.6
牧场3	奶牛320头,交叉试验,直接替代豆粕,0.7公斤/头/天	+0.3
牧场4	奶牛1,700头,生产水平均衡,直接替代豆粕,2.4公斤/头/天	+1.0
牧场5	奶牛330头,生产水平均衡,直接替代棉籽粕,1.7公斤/头/天	+1.2

表 24. 卡诺拉菜粕取代其他蛋白质饲料示范试验(中国)

纯压榨卡诺拉菜粕饲喂泌乳奶牛

反刍动物可用的饲料原料不多，纯压榨卡诺拉菜粕也可作为反刍动物的蛋白质饲料。与预榨浸提卡诺拉菜粕相比，纯压榨菜粕的研究不多，其营养价值与预榨浸提菜粕相似，但脂肪含量较高，能量价值也高。

作为蛋白质的一部分，纯压榨菜粕的过瘤胃蛋白占比比较多，Theodoridou和Yu(2013)采用分子光谱法确认纯压榨菜粕蛋白质受热改变的程度比预榨浸提菜粕的更大。此外，Heim和Krebs(2018)测得湿热处理纯压榨菜粕的过瘤胃蛋白比冷处理纯压榨菜粕多，其占比随湿热处理的

压力和时间线性增加。

不同榨油工艺生产的菜粕，如预榨浸提、纯压榨和湿热纯压榨卡诺拉菜粕，均可饲喂奶牛。早期在萨斯喀彻温大学的饲养试验(Beaulieu et al., 1990; Jones et al., 2001)，近期在宾夕法尼亚州立大学(Hristov et al., 2011)的饲养试验表明，在泌乳奶牛日粮中配合纯压榨卡诺拉菜粕，其产奶量与预榨浸提卡诺拉菜粕相当，甚至更高(表 25)。

文献	榨油工艺	产奶量
Beaulieu et al., 1990	预榨浸提	28.0
	纯压榨	28.0
Hristov et al., 2011	预榨浸提	41.7
	纯压榨	41.7
Jones et al., 2001 ¹	预榨浸提	28.6
	纯压榨	30.0
	湿热处理纯压榨	30.0
Jones et al., 2001 ²	预榨浸提	23.6
	纯压榨	24.0
	热处理纯压榨	25.2

¹经产奶牛

²初产奶牛

表 25. 不同榨油工艺生产的卡诺拉菜粕对奶牛产奶量的影响，公斤 / 头 / 天

与其他植物蛋白比较，纯压榨卡诺拉菜粕在改善乳脂脂肪酸组成方面表现出色。Johansson和Nadeau(2006)在奶牛有机日粮用纯压榨卡诺拉菜粕替代其他蛋白质饲料，观察到产奶量由35.4公斤/天增加到38.4公斤/天，牛奶的饱和脂肪酸浓度降低，特别是棕榈酸(C16:0)由30.3%降低到21.9%，乳脂中油酸(C18:1)由15.7%增加到20.9%。Jones等(2001)也同样观察到奶牛饲喂纯压榨卡诺拉菜粕时牛奶脂肪酸的变化。Hristov等(2011)用纯压榨卡诺拉菜粕取代其他籽粕饲喂泌乳奶牛，也证实纯压榨卡诺拉菜粕降低了牛奶中饱和脂肪酸的浓度，增加了乳脂油酸的比例。这些结果表明，保留在纯压榨菜粕中的脂肪对瘤胃生物氢化有一定的抵抗力，一部分能被小肠直接吸收。

虽然在加拿大评估纯压榨卡诺拉菜粕的试验不多，但欧洲评估双低菜粕的试验结果可供借鉴。Rinne等(2015)以三叶草做青贮饲料，比较纯压榨豆粕或纯压榨双低菜粕配合比例渐次增加对泌乳奶牛生产性能的影响，随两种蛋白质饲料配比增加，能量校正奶产量随之增加。Gidlund等(2017)用纯压榨双低菜粕饲喂奶牛，检测到奶牛甲烷排放减少。还有一个试验用纯压榨普通菜粕取代泌乳奶牛日粮中的蚕豆，结果导致采食量下降，产奶量降低(Puhakka et al., 2016)。



卡诺拉油菜籽饲喂奶牛

总体而言，卡诺拉油菜籽或芥花油饲喂奶牛并不常见。人们曾对过瘤胃菜籽或油有过兴趣，目的是生产品牌肉或品牌奶。Chicholowski等(2005)曾用粉碎的卡诺拉油菜籽和纯压榨卡诺拉菜粕饲喂反刍动物，并观察到粉碎菜籽的好处，降低了乳脂omega-6和omega-3的比例，增加了牛奶共轭亚油酸(CLA)和反式异油酸(CLA前体)比例，虽然对产奶量没有影响，但提高了牛奶健康品质。

Johnson等(2002)也观察到卡诺拉油菜籽和棉籽饲喂奶牛时，牛奶共轭亚油酸和油酸比例增加；整粒、粉碎或膨化卡诺拉油菜籽饲喂奶牛，乳脂饱和脂肪酸比例降低，补充卡诺拉脂肪酸的钙盐也有同样效果(Bayourthe et al., 2000)。除了卡诺拉油菜籽，其他高脂肪卡诺拉油菜产品也提高了牛奶产量，表明加工过的油菜籽或过瘤胃的菜籽油是改变奶制品脂肪酸成分的有效方法。

Ahsani等(2019)在奶牛日粮配比占干物质9%的卡诺拉油菜籽或全脂大豆，并补充2%油脂使配方中脂肪达8%，结果显示两种日粮都导致乳脂下降，卡诺拉油菜籽日粮的产奶量增加，为41.9公斤/头/天，而大豆日粮的产奶量只有38.4公斤/头/天，两者牛奶不饱和脂肪酸含量相似。

大量证据支持特定脂肪酸对奶牛健康和繁殖的积极效应。在干奶期母牛日粮配比卡诺拉油菜籽(C18:1)或葵

花籽(C18:2)，母牛分娩后饲喂相同泌乳期日粮，以评估油酸或亚油酸对母牛健康、繁殖性能及犊牛健康的影响(Salehi et al., 2016a, 2016b)。与对照组比较，卡诺拉油菜籽和葵花籽日粮都增加了犊牛初生重，但也增加了繁殖障碍的风险，葵花籽日粮改善了初乳品质，卡诺拉油菜籽日粮则对初乳品质没有影响。

Beauchemin等(2009)在泌乳母牛日粮分别配比粉碎的亚麻籽、葵花籽或卡诺拉油菜籽，考察长链脂肪酸对瘤胃甲烷产出的影响，亚麻籽和葵花籽是多不饱和脂肪酸的来源，而卡诺拉油菜籽是单不饱和脂肪酸的来源。与对照组比较，无论亚麻籽、葵花籽或卡诺拉油菜籽，所有脂肪酸都降低了瘤胃甲烷产出，但亚麻籽和葵花籽日粮降低了干物质消化率，卡诺拉油菜籽日粮的干物质消化率则没有影响。该试验在泌乳高峰期后，没观察到不同处理对产奶量的影响。

肉牛

已证明卡诺拉菜粕是肉牛的优质饲料，能够替代其他几种植物蛋白质。如前所述，卡诺拉菜粕的能量与大麦近似(Nair et al., 2015, 2016)，是肉牛生长期有价值的能量饲料，也可以作为育肥及冬季牧场宝贵的能量和蛋白质来源。

饲养试验结果支持卡诺拉菜粕饲喂放牧的母牛。Patterson等(1999a, 1999b)在劣质牧场给母牛分别补饲豆类、葵花籽粕或卡诺拉菜粕，评估其对犊牛初生重、断奶重及母牛体况的影响。结果显示，三种蛋白质饲料对以上三方面的影响基本相当，但补充卡诺拉菜粕的母牛体重孕期损失最少。一项试验用卡诺拉菜粕部分替代放牧母牛日粮中的小麦，观察到母牛泌乳量增加(Auldist et al., 2014)；后续试验中，研究人员在部分混合日粮配比卡诺拉菜粕，观察到泌乳早期草料干物质摄入量增加，能量矫正奶产量也增加。Damiran等(2016)评估了卡诺拉菜粕替代小麦酒糟的效果，试验期间饲喂小麦酒糟的母牛体重损失7.8公斤，而饲喂卡诺拉菜粕的母牛体重损失仅2.5公斤，无论小麦酒糟或卡诺拉菜粕对犊牛初生重或断奶重没有显著影响。

草场放牧的小牛补饲卡诺拉菜粕同样受益。Lynch等(2021)在劣质草场给5-6月龄断奶犊牛补饲卡诺拉菜粕，补饲量分别占体重的0.5、1.0、1.5和2.0%，由少到补饲量1.5%，干物质采食量和平均日增重线性增加。

生长期补饲蛋白质有益于肉牛成长发育。Yang等(2013)发现补饲卡诺拉菜粕增加了生长期阉牛的采食量和体重。Li等(2014)给生长期小母牛补饲卡诺拉菜粕、小麦酒糟、高蛋白玉米酒糟加尿素，补饲这几种蛋白质饲料都增加了干物质采食量，改善了生长性能，其中卡诺拉

菜粕的全消化道消化率最高，高蛋白玉米酒糟加尿素的十二指肠总蛋白质最高。萨斯喀彻温大学曾做过两个生长期肉牛试验，对比等氮豆粕或卡诺拉菜粕日粮、小麦酒糟部分替代豆粕或卡诺拉菜粕对生长性能的影响，第一次试验观察到豆粕与小麦酒糟组体增重最少，第二次试验则没有看到小麦酒糟替代所产生的负面影响Good(2018)。

Prado和Martins(1999)在98天试验期，给育肥母牛配制高粱青贮日粮，分别配比19.7%卡诺拉菜粕或19.5%棉籽粕，观察到卡诺拉菜粕组日增重1.05公斤，而棉籽粕组日增重仅0.87公斤。He等(2013)在育肥期肉牛日粮分别配比15%或30%卡诺拉菜粕，并替代日粮中的大麦，结果显示无论15%或30%卡诺拉菜粕，两组日粮的日增重没有差别；与大麦对照组比较，30%卡诺拉菜粕组增加了干物质采食量，但饲料效率略有下降。Damiran和McKinnon(2018)在育肥期肉牛日粮用卡诺拉菜粕替代10%和20%的大麦，发现与大麦对照组的生长性能没有差异。一般在肉牛日粮中不会配比这么多卡诺拉菜粕，至少说明肉牛不拒食大量卡诺拉菜粕。一项饲养试验观察四种蛋白质饲料：卡诺拉菜粕、豆粕、50%卡诺拉菜粕+50%小麦酒糟、50%豆粕+50%小麦酒糟，对生长育肥期肉牛生产性能的影响，结果表明卡诺拉菜粕、卡诺拉菜粕+小麦酒糟、豆粕日粮在体增重、饲料效率方面没有差异，但豆粕+小麦酒糟日粮对肉牛育肥性能和牛肉等级有不利影响(Good, 2018)。



卡诺拉菜粕富集含硫氨基酸，是生产羊毛和马海毛理想的蛋白质饲料(White et al., 2000; Easton et al., 1998)。此外，卡诺拉菜粕也被证明可以支持这些肉类反刍动物的生长和泌乳。

小反刍动物

绵羊

过去的几个试验表明，卡诺拉菜粕能支持绵羊的生长和生产，在其日粮中的配比没有限制。此外，卡诺拉菜粕可以提高绵羊采食量(Hentz et al., 2012)，即使在羔羊日粮中配比30%双低菜粕，日粮硫代葡萄糖苷浓度6.3微摩尔/克，也对羔羊采食量和增重没有影响，但菜粕比例增加导致羔羊甲状腺重量增加、甲状腺激素分泌减少(Mandiki et al., 1999)。在羔羊日粮配比7%膨化卡诺拉油菜籽，提高了羔羊生长速度，增加了羊肉肌内脂肪、眼肌面积和感官品相(Asadollahi et al., 2017)。

传统上，羽扇豆一直是澳大利亚羔羊首选的植物蛋白饲料，但卡诺拉菜粕在饲料效率和体增重(分别为272

克/天和233克/天)方面优于羽扇豆(Wiese, 2004)，后来的试验结果也支持卡诺拉菜粕在羔羊增重方面优于羽扇豆(Malau-Aduli et al., 2009)。加拿大的一项研究显示，卡诺拉菜粕在羔羊生长方面比鱼粉更有优势(Agbossamey et al., 1998)。

直到最近，Sekali 等(2020)给生长期羔羊配制等氮日粮，用卡诺拉菜粕或热处理卡诺拉菜粕替代豆粕，数据说明卡诺拉菜粕可以很容易地替代豆粕，热处理工艺并没有给菜粕带来额外价值，生长性能、胴体特征或羊肉品质在各处理间没有差异。卡诺拉菜粕也被认为更具环境可持续性。

山羊

山羊奶和牛奶的氨基酸组成相似，卡诺拉菜粕也应该适合泌乳期山羊，能增加干物质采食量、提高产奶量(Tajaddini et al., 2021)；研究人员还发现甲醛处理可以提高籽粕粗蛋白过瘤胃率，进而降低籽粕配合比例。

Andrade和Schmidely(2006)给泌乳期山羊配制0%或20%去皮卡诺拉油菜籽日粮，后者显著地增加了产奶量；后续为期8周的饲养试验，在浓缩料配比膨化大豆或去皮卡诺拉油菜籽，数据显示产奶量和奶成分没有差异(Schmidely and Andrade, 2011)。

卡诺拉菜粕同样可以支持山羊生长。大多数的研究报告都用整粒卡诺拉油菜籽以提高日粮的能量水平，在饲料转化效率方面，卡诺拉油菜籽日粮优于豆粕、亚麻籽粕或葵花籽，但各日粮的平均日增重相当(Grande et al., 2014)。与棕榈油相比，山羊生长期日粮加入芥花油可以增加肌肉omega-3脂肪酸，改善氧化稳定性，减少脏器脂肪沉积(Karami et al., 2013)。

CH.4 SWINE

第四章 卡诺拉菜粕 对猪的价值

饲料营养价值评估体系越来越精准，对饲料价值的认识越来越深刻，猪日粮配比卡诺拉菜粕也被广泛接受。随配方技术改进，在生长育肥阶段及繁殖周期的配比逐渐增加，饲养效果也确实可靠。





卡诺拉菜粕在猪日粮的配合比例

日粮/阶段	配合比例
断奶仔猪	试验日粮配比40%，仔猪性能表现佳
中大猪	配比25%性能最佳，超过25%无数据
妊娠母猪	配比25%性能最佳，超过25%无数据
哺乳母猪	配比25%性能最佳，超过30%无数据

盈利能力

一项荟萃分析通过改变配方以改善日粮盈利能力，结果显示降低日粮粗蛋白可以最大限度节省配方成本(Wang et al., 2020)。卡诺拉菜粕的氨基酸组成最为接近理想氨基酸模型(表1)，比其他植物蛋白的利用效率更高，允许在配方中以最低的蛋白质获得溢价。展望养猪未来趋势，饲料不仅考虑其消化率，还要参考其他因子如粪便排泄、温室气体产出、肠道健康和免疫力，卡诺拉菜粕可能会提供超出其营养成分之外的价值。

氨基酸	模型, % 赖氨酸		卡诺拉菜粕, % 赖氨酸	
	INRA	NRC	原样	+ 赖氨酸 ¹
蛋氨酸	30	29	33	30
蛋氨酸 + 胱氨酸	60	56	63	58
苏氨酸	65	61	74	67
缬氨酸	70	65	73	67
异亮氨酸	55	52	59	54
亮氨酸	100	101	123	113
苯丙氨酸	50	60	69	63
苯丙氨酸 + 酪氨酸	95	94	109	100
组氨酸	32	34	56	51
精氨酸	42	46	108	99

¹卡诺拉菜粕原样赖氨酸 = 理想赖氨酸 × 1.09

表 1. 卡诺拉菜粕理想氨基酸组成, % 赖氨酸

可持续性

卡诺拉菜粕是有价值的加工副产品，相对于其他植物蛋白，卡诺拉菜粕在猪日粮中并未增加温室气体产出，养猪业温室气体主要源于粪便。玉米基础日粮分别配合豆粕、玉米蛋白粉、卡诺拉菜粕或禽肉骨粉，猪的平均日增重或饲料转化效率基本相似，粪便排出在各处理间没有显著差别，甲烷或二氧化碳产出基本相当，但卡诺拉菜粕日粮的氨气产出最少，其次是禽肉骨粉，显著少于玉米蛋白粉或豆粕日粮(Trabue et al. (2021)。

对环境影响的另一个关注点是磷，通常会在豆粕或卡诺拉菜粕日粮添加植酸酶。卡诺拉菜粕-高粱日粮饲喂生长育肥猪，不需要额外添加无机磷，作者认为卡诺拉菜粕日粮能提高养猪业的可持续性(Veum and Liu, 2018)。

适口性与采食量

饲料原料对猪的适口性很难客观评价，变量包括原料本身的适口性、配合比例、配方中其他原料、全混合饲料的能量、纤维、堆积密度、矿物质平衡等因子。就卡诺拉菜粕本身而言，其中的抗营养因子如硫代葡萄糖苷、丹宁、芥子碱、纤维及矿物质(见第二章)，可能会潜在降低采食量。硫代葡萄糖苷有苦味，会对猪和其他动物采食量产生负面影响。

产于加拿大的卡诺拉菜粕味道中性，其硫代葡萄糖苷只有3.57微摩尔/克，而普通菜粕的硫代葡萄糖苷通常超过100微摩尔/克(见第二章)，高硫苷的普通菜粕只能在日粮中占很少份额，以免影响采食量，要避免采食量降低，需谨慎配比普通菜粕。预榨浸提卡诺拉菜粕经低、中、高压榨强度，分别替代对照组日粮中20%豆粕，虽然高强度挤压会进一步降低菜粕硫代葡萄糖苷，但断奶仔猪的采食量在各处理间未见显著性差异，日增重和饲料效率也无显著变化(Heyer et al., 2018)。数据说明进一步降低卡诺拉菜粕硫代葡萄糖苷对采食量无益，断奶仔猪对卡诺拉菜粕和豆粕日粮的采食量一样多。

一项采食偏好试验，喂给断奶仔猪卡诺拉菜粕或豆粕型日粮，观察到仔猪偏好采食豆粕型日粮(Landero et al. 2018)，这与以前的报道一致。若仔猪没有选择，只有卡诺拉菜粕型日粮且配比20%，生长性能和采食量并没有受到影响，过去对于其可消化养分的评估存在一些问题，导致生长性能不佳，故而实践中仍限制卡诺拉菜粕的配比。最近的研究对卡诺拉菜粕营养价值有了更深的理解，采用适当的配方技术可以更好地利用其价值，高效支持猪的生长发育。有效能量是限制其配比和价值的主要因素，特别在净能配方体系。最终，成本和养分之间的关系将决定其在配方所占的适当份额。

蛋白质与氨基酸

氨基酸组成

卡诺拉菜粕氨基酸成分能高效满足猪对氨基酸的需要，赖氨酸是第一限制性氨基酸，但工业合成的赖氨酸很容易获得，在卡诺拉菜粕日粮添加赖氨酸，很容易满足猪的营养需要。

氨基酸组成通常以必需氨基酸与赖氨酸的百分比表示，原料比较要求以相同的方式表达。采用NRC(2012年)或法国国家农业研究所(INRA)模型(van Milgen and Dourmad,2015)的建议，卡诺拉菜粕的氨基酸组成几乎完美，略高于大多数氨基酸的要求(表1,"原样")。通过补充赖氨酸，该组成满足需要且略有剩余(表1,+赖氨酸)。这表明猪可以高效地利用卡诺拉菜粕中的氨基酸。



氨基酸消化率

猪日粮配方以可消化氨基酸为准，而不是总氨基酸。最近的小猪和中大猪饲养试验采用可消化氨基酸平衡配方，即使卡诺拉菜粕在配方中占比很高，卡诺拉菜粕日粮的生长性能与豆粕日粮相当，参阅本指南“卡诺拉菜粕在小猪日粮的价值”。

试验显示，猪日粮配方应以真实氨基酸为准，参照标准氨基酸消化率(Nyachoti, et al., 1997)，标准回肠消化率是目前最推崇的一种测度(Stein et al., 2007)，因其可靠地校正了动物消化过程中内源性损失及未被消化的成分。表2列举了近年关于预榨浸提卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠消化率的研究数据，表3则是纯压榨卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠消化率。这些数据都是以加拿大本土榨油厂出产的菜粕为试验样本。

氨基酸	平均值 ² , %	标准差
必需氨基酸		
精氨酸	88.05	3.08
组氨酸	80.99	9.73
异亮氨酸	80.18	4.52
亮氨酸	82.73	3.94
赖氨酸	79.54	5.18
蛋氨酸	86.87	3.79
苯丙氨酸	82.00	5.59
苏氨酸	76.84	5.57
色氨酸	86.10	5.03
缬氨酸	78.22	4.85
非必需氨基酸		
丙氨酸	80.64	4.62
天冬氨酸	77.09	5.55
胱氨酸	75.80	7.34
谷氨酸	86.13	2.62
甘氨酸	80.03	7.38
脯氨酸	85.74	9.27
丝氨酸	79.56	5.46
酪氨酸	80.50	5.43

氨基酸	平均值 ² , %	标准差
必需氨基酸		
精氨酸	86.38	3.99
组氨酸	84.55	2.46
异亮氨酸	79.15	2.01
亮氨酸	78.63	6.60
赖氨酸	78.00	2.09
蛋氨酸	84.60	4.10
苯丙氨酸	79.85	4.54
苏氨酸	73.33	4.89
色氨酸	85.97	3.35
缬氨酸	75.05	5.68
必须氨基酸		
丙氨酸	78.00	5.53
天冬氨酸	75.18	5.82
胱氨酸	74.55	5.97
谷氨酸	83.45	5.98
甘氨酸	71.48	12.62
脯氨酸	85.60	7.35
丝氨酸	77.90	7.01
酪氨酸	77.50	3.83

表 3. 纯压榨卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠可消化率 (SID) – 生长育肥猪¹

¹Seneviratne et al., 2011; Grageola et al., 2013; Park et al., 2019; Woyengo et al., 2016

²三次测定平均值

表 2. 预榨浸提卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠可消化率 (SID) – 生长育肥猪¹

¹Adewole et al., 2017; Almeida et al., 2014; Berrocoso et al., 2015; Favero et al., 2014; Le et al., 2017; Kim et al., 2015; Le Thanh et al., 2019; Maison and Stein, 2014; Mejicanos and Nyachoti, 2018; Park et al., 2019; Sanjayan et al., 2014; Trindade Neto et al., 2012; Velayudhan et al., 2019

²43次测定平均值

能量

能值测定

卡诺拉菜粕含有大量复杂的碳水化合物，其消化率相对受限，以净能为基础的猪料配方允许一定配比且不会影响生产性能。基于历史资料，表4归纳了NRC(2012)公布的卡诺拉菜粕能量值，也附加了近期的测定数据。确定的能值似乎在一个区间，净能为1960-2233千卡/公斤(Kim et al., 2018)，这与测定方法有关。

文献	消化能	代谢能	净能
NRC, 2012	3154	2903	1821
Berrocoso et al., 2015	3084	2922	1928 ¹
Heo et al., 2014	2901	2692	1850
Kim et al., 2018	3180	2925	2099
Le et al., 2017	2605	2409	1765
Le Thanh et al., 2019	3273	3012	1834
Liu et al., 2014	2883	2681	1769
Liu et al., 2016	2630	2303	1520 ¹
Liu et al., 2018	2972	2724	1789 ¹
Sanchez-Zannatta et al., 2022	2843	2615	1524
Woyengo and Zijlstra, 2021	2880	2600	1720
Zhong and Adeola, 2019	2798	2601	1718 ¹

¹计算值=ME x 0.66 (Kil et al., 2013)

表 4. 预榨浸提卡诺拉菜粕能值 (原样), 千卡 / 公斤

纯压榨卡诺拉菜粕的能值与预榨浸提菜粕不同，随粕中油分含量而变化，其净能估计方程为(Woyengo et al., 2016):

$$\text{净能(千卡/公斤)} = 0.700 \times \text{消化能} + 1.61 \times \text{乙醚抽提物} + 0.48 \times \text{淀粉} - 0.91 \times \text{粗蛋白} - 0.87 \times \text{酸性洗剂纤维}$$

纤维与消化

纤维是植物性原料中复杂碳水化合物的总称，其成分可能随检测方法而变化(Kerr and Shurson, 2013)。通常认为纤维的消化率可以忽略不计，实际上是相当多变的，大部分消化发生在肠道，且产生的挥发性脂肪酸可以支持肠道组织的需求。在猪饲料研究中，纤维消化本身并不常见。最近的一项研究，估计卡诺拉菜粕约三分之二的非淀粉多糖被消化(Lannuzel et al., 2022)。以前认为增加日粮中的纤维会降低后肠中消化的纤维比例，但这一理论被证明是错误的(Navarro et al., 2018)，菜粕从来都不是猪日粮纤维的唯一来源，需要考虑纤维的来源及其相互作用。

饲料酶改善能量效率

行业已开发和利用复合碳水化合物酶，这些酶可以消化非淀粉多糖的细胞壁，从而提高卡诺拉菜粕日粮的能量水平。以断奶仔猪为例，卡诺拉菜粕日粮添加复合碳水化合物酶，虽然没有改善生长性能，但粗蛋白全消化道表观消化率分别提高了20%和25%(Sanjayan et al., 2014); 以哺乳母猪为例，卡诺拉菜粕日粮干物质和总能全消化道表观消化率分别提高了3.6%和3.3%，采食量并未改变，但母猪体况损失减少，分别为5.3公斤和3.3公斤(Velayudhan et al. (2018)。以上数据来自饲养试验整

个周期，实际应用可能与卡诺拉菜粕配比不同而有出入。

体外消化模型适用于饲料原料的评估，也可用于卡诺拉菜粕体外消化试验。复合酶包括木聚糖酶、葡聚糖酶、纤维素酶、甘露聚糖酶、转化酶、淀粉酶和果胶酶，对预榨浸提或纯压榨卡诺拉菜粕的干物质消化率，分别提高了8.7%和9.2%(Lee et al., 2018)。数据显示，卡诺拉菜粕日粮添加复合酶提高了消化率，减少了后肠发酵，降低了挥发性脂肪酸和气体产出。

脂肪酸

卡诺拉菜粕脂肪多为单不饱和脂肪酸，饱和脂肪酸的占比较少，猪很容易消化这类脂肪酸，比如，猪对纯压榨卡诺拉菜粕脂肪的消化率达93.6%(Seneviratne et al., 2011)。生长育肥猪玉米豆粕型日粮配比3%的芥花油，增加了猪肉油酸浓度，被视为改善猪肉健康品质的营养措施(Silva et al. (2021)。

矿物质与维生素

第二章已详细列举了卡诺拉菜粕矿物质和维生素，此外还有钙和磷的专题研究。

卡诺拉菜粕富含磷。与其他油料籽粕一样，大部分磷是植酸磷，添加植酸酶能改善磷的消化率，减少配方中无机磷的添加，降低配方成本。试验证实，卡诺拉菜粕磷的平均消化率约34%，植酸酶可以将其提高至61%(Akinmusire and Adeola, 2009; Favero et al., 2014; Adhikari et al., 2016)。无植酸酶条件下，5个卡诺拉菜粕消化试验得知磷的消化率为45%，高于早先的平均消化率，若添加植酸酶，磷的消化率提高到64%，与早先的研究一致(Maison et al., 2015)。卡诺拉菜粕-高粱型日粮添加植酸酶，配方中可以不再额外补充无机磷(Veum and Liu, 2018)。

植酸酶不仅改善菜粕磷的利用效率，也能改善钙的消化率。比如植酸酶将卡诺拉菜粕钙消化率由47%提升到70%(Gonzalez-Vega, et al., 2013)，类似的研究证实钙的消化率由58%提升到75%(Adhikari et al., 2016)。

油菜籽压榨工艺可能影响菜粕磷的消化率。热处理能提高预榨浸提或纯压榨卡诺拉菜粕磷的利用效率(Nyachoti, 2021)。

预榨浸提卡诺拉菜粕对猪的价值

荟萃分析

已有几个荟萃分析评估了卡诺拉菜粕在猪日粮的价值，其中一个报告采信了37个试验报告，评估卡诺拉菜粕在断奶仔猪日粮的配比从2%到40%，干物质采食量有些微下降，但不影响平均日增重，饲料效率略微改善；在生长育肥猪日粮配比3.8%到49.0%，与对照组比较，平均日增重略微减少，但与卡诺拉菜粕配比多少关系不大；

在断奶仔猪和生长育肥猪平衡日粮，卡诺拉菜粕对生长性能没有负面影响(Hansen et al., 2020)。

也有荟萃分析采用多元回归模型预测油料籽粕氨基酸的消化率(Messad et al., 2016)，发现中性洗涤剂纤维与氨基酸消化率呈负相关(图1)。

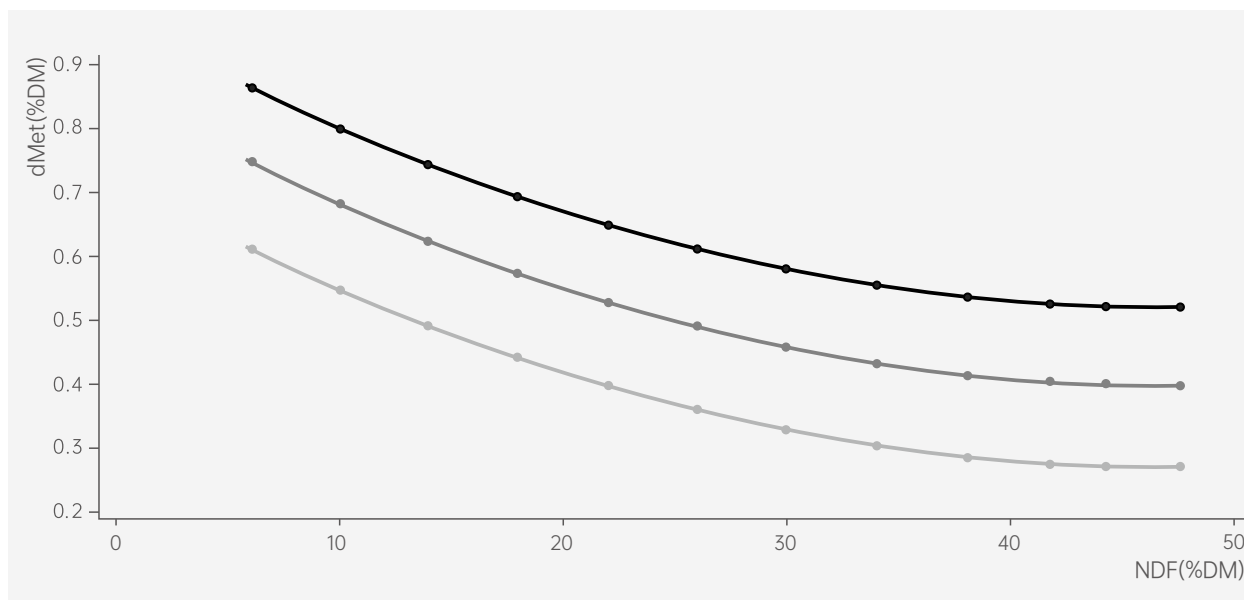


图1. 猪日粮中性洗涤剂纤维含量对蛋氨酸标准回肠消化率的影响 (黑线 - 豆粕, 灰线 - 普通菜粕, 浅灰线 - 棉粕)

硫代葡萄糖苷耐受性

硫代葡萄糖苷是卡诺拉菜粕中最主要的抗营养因子，猪对其相当敏感，尤其是仔猪(Bischoff, 2019)。早期饲养试验已确定了猪日粮硫代葡萄糖苷的耐受性在2.0-2.5微摩尔/克(Bell, 1993)，后续的饲养试验，体重20-50公斤的小猪饲喂相同配比但硫代葡萄糖苷含量0-19微摩尔/克的卡诺拉菜粕(Schone et al., 1997a)，确认了猪对硫代葡萄糖苷的耐受性(Schone et al., 1997a, 1997b)。

猪日粮硫代葡萄糖苷浓度超过2.4微摩尔/克就会影响采食量、生长率和甲状腺功能，小猪日粮的安全限为2.0

微摩尔/克(Schone et al., 1997b)。加拿大出产的卡诺拉菜粕葡萄糖苷含量平均为3.6微摩尔/克，最多可以在配方中配比55-69%，这么高的配比已超过了猪对谷物型日粮氨基酸的需要。最近的饲养试验在小猪阶段配比40%的卡诺拉菜粕(Parr et al., 2015)，在生长育肥阶段配比30%的卡诺拉菜粕(Smit et al., 2014a)，其生长性能良好。尽管对猪日粮硫代葡萄糖苷存有戒心，数据显示的卡诺拉菜粕配合比例似乎没有限制。



小猪

卡诺拉菜粕是断奶仔猪有价值的蛋白质饲料。体重8.1公斤的断奶仔猪，配比20%卡诺拉菜粕的日粮不会影响其生长发育(Landero et al., 2011)；体重7.26公斤的断奶仔猪，配比25%卡诺拉菜粕的日粮在饲喂一周后，生长性能相当好(Sanjayan et al., 2014)。体重6.7公斤的断奶仔猪，采用净能和可消化氨基酸配方体系，分别饲喂配比20%卡诺拉菜粕或20%豆粕的玉米日粮，两种日粮的生长性能基本相当(Mejicanos et al., 2017)。

快速生长期，猪对豆粕和卡诺拉菜粕日粮的全消化道表观消化率有差别，尽管卡诺拉菜粕的来源或品质特征可能有所不同，但试验中4个来源卡诺拉菜粕的消化率没有差别(Wang et al., 2017)。

还有一个饲养试验，仔猪日粮分别配比10%、20%、30%和40%卡诺拉菜粕，逐渐替代配方中的豆粕，随卡诺拉菜粕配比增加，采食量线性降低，饲料效率线性提高，平均日增重没有显著差异(Parr et al., 2015)。采用合理的配方体系，仔猪日粮配比40%的卡诺拉菜粕，平均日增重和饲料效率在统计意义上并没有显著性差异(表5)。

卡诺拉菜粕对猪生长性能的影响可能是能量水平较低所致，因为体重20公斤以下的仔猪还不能依据能量密度调整采食量(Kim et al., 2015)。

文献	配比, %	性能	卡诺拉菜粕	豆粕	P值
Do et al., 2017	8	平均日增重, g	142	165	0.280
		重/料	0.54	0.50	0.162
Hong et al., 2020	10	平均日增重, g	359	323	<0.05
		重/料	0.62	0.50	<0.05
	20	平均日增重, g	378	323	
		重/料	0.66	0.50	
	30	平均日增重, g	352	323	
		重/料	0.64	0.50	
	40	平均日增重, g	325	323	
		重/料	0.56	0.5	
Landero et al., 2011	20	平均日增重, g	493	488	0.592
		重/料	0.7	0.73	0.087
Mejicanos et al., 2017	20	平均日增重, g	408	408	0.459
		重/料	0.61	0.59	0.024
Parr et al., 2015	10	平均日增重, g	590	560	0.108
		重/料	0.6	0.59	0.001
	20	平均日增重, g	610	560	
		重/料	0.65	0.59	
	30	平均日增重, g	580	560	
		重/料	0.65	0.59	
	40	平均日增重, g	570	560	
		重/料	0.68	0.59	
Sanjayan et al., 2014	5	平均日增重, g	472	452	0.979
		重/料	0.6	0.60	0.714
	10	平均日增重, g	468	452	
		重/料	0.59	0.60	
	15	平均日增重, g	453	452	
		重/料	0.6	0.60	
Seneviratne et al., 2011	15	平均日增重, g	445	469	0.87
		重/料	0.71	0.71	0.323
Wang et al., 2017	20	平均日增重, g	664	660	0.487
		重/料	0.66	0.65	0.047

表 5. 卡诺拉菜粕对小猪生长性能的影响 (对照组为豆粕日粮)

生长育肥猪

表6收录了3个生长育肥猪的数据，其中两个试验的生长性能与豆粕日粮没有显著差异。预榨浸提卡诺拉菜粕与纯压榨豆粕比较，卡诺拉菜粕的饲料效率高于豆粕(Smit et al., 2018)。研究人员发现，陡然在生长育肥猪日粮中配比25%卡诺拉菜粕，短期内观察到采食量下降，随试验时间延续，采食量恢复，且饲料效率显著优于豆粕。如果卡诺拉菜粕配比陡然提升，可能要做出必要改变。

文献	配比, %	性能	卡诺拉菜粕	豆粕	P值
Kim et al., 2015	11.3	平均日增重, g	700	725	0.102
		重/料	0.46	0.44	0.196
Little et al., 2015	27.3/23.2	平均日增重, g	940	930	0.700
		重/料	0.36	0.37	0.200
Smit et al., 2018 ¹	25/20	平均日增重, g	988	1025	0.001
		重/料	0.36	0.37	0.001

¹对照组日粮为纯压榨豆粕

表 6. 预榨浸提卡诺拉菜粕与纯压榨豆粕对生长育肥猪生长性能的影响

热带生长育肥猪

热带生长育肥猪试验在墨西哥Nuevo Leon, Sonora和Michoacan州完成，目的是验证此前加拿大饲养试验的结果(Hickling, 1996)。试验日粮均由墨西哥本地饲料原料组成，其中两个试验有高粱，一个试验有玉米，而菜粕都来自墨西哥本地榨油厂进口的加拿大卡诺拉油菜籽，试验设计与加拿大试验类似(表7、表8)，包括一个对照组，一个卡诺拉菜粕配比低的日粮和一个卡诺拉菜粕配比高的日粮，生长期试验结果列于表9；为了解热带气候的影响，也考察了育肥阶段生长性能、饲料效率及胴体品质(表10)，鉴于品种和季节因素，三个地域的性能表现有所不同。

饲料	生长期			育肥期		
	豆粕	低配比卡诺拉菜粕	高配比卡诺拉菜粕	豆粕	低配比卡诺拉菜粕	高配比卡诺拉菜粕
大麦	62	53	48	60	48	40
小麦	13	20	24	19	29	35
豆粕	20	16	13	16	10	5
卡诺拉菜粕	0	6	10	0	8	15
芥花油	1	1	1	1	1	1
赖氨酸	0.04	0.07	0.06	0.12	0.12	0.15
多维/多矿	4	4	4	4	4	5
性能						
采食量, kg/天	1.91	1.93	1.89	3.06	3.11	3.08
增重, kg/天	0.76	0.76	0.77	0.84	0.83	0.82
重/料	0.42	0.42	0.41	0.26	0.27	0.27

¹Hickling, 1994.

表 7. 加拿大饲养试验：卡诺拉菜粕配合比例对生长期(20-60公斤)和育肥期(60-100公斤)性能的影响¹



性能	豆粕	低配比卡诺拉菜粕	高配比卡诺拉菜粕
采食量, kg/天	2.46	2.5	2.47
增重, kg/天	0.8	0.8	0.8
重/料	0.33	0.32	0.32
屠宰率, %	78	78	78
背标指数	107	107	107

¹Hickling, 1994表 8. 加拿大饲养试验：卡诺拉菜粕配合比例对猪生长育肥期 (20-100 公斤) 性能的影响¹

饲料	生长期			育肥期		
	豆粕	低配比卡诺拉菜粕	高配比卡诺拉菜粕	豆粕	低配比卡诺拉菜粕	高配比卡诺拉菜粕
高粱或豆粕	72	68	67	76	72	70
豆粕	24	19	16	20	13	10
卡诺拉菜粕	0	8	12	0	10	15
牛油	0	1	2	0	1	2
赖氨酸	0	0.33	0.47	0.12	0.50	0.70
多维/多矿	4	4	4	4	4	5
性能						
采食量, kg/天	2.17	2.23	2.18	3.22	3.21	3.12
增重, kg/天	0.78	0.77	0.76	0.85	0.83	0.82
重/料	0.36	0.35	0.35	0.26	0.26	0.26

¹Hickling, 1996.表 9. 墨西哥热带饲养试验：卡诺拉菜粕对比对猪生长期 (20-60 公斤) 和育肥期 (60-100 公斤) 性能的影响¹

性能	豆粕	低配比卡诺拉菜粕	高配比卡诺拉菜粕
采食量, kg/天	2.72	2.74	2.67
日增重, kg/天	0.82	0.81	0.80
重/料	0.30	0.29	0.29
出肉率, %	48.6	48.8	49.3
背标指数	2.38	2.33	2.15

¹Hickling, 1996表 10. 墨西哥热带饲养试验：卡诺拉菜粕对比对猪生长育肥期 (20-100 公斤) 性能的影响¹

早期饲养试验证实，后备母猪和经产母猪都能接受卡诺拉菜粕日粮，日粮是否配比10%卡诺拉菜粕对母猪繁殖性能无影响(Flipot and Dufour, 1977)，后备母猪第一胎的繁殖性能与豆粕日粮等同(Lee et al., 1985)，12%卡诺拉菜粕日粮饲养的后备母猪连续两个繁殖周期生产性能也无差别(Lewis et al., 1978)；配比20%卡诺拉菜粕的日粮也不影响哺乳母猪的繁殖性能(King et al., 2001)。以上说明，卡诺拉菜粕可以是后备母猪和经产母猪日粮的主要蛋白质饲料。

最近的哺乳母猪饲养试验中，日粮配比0、15%或30%的卡诺拉菜粕，仔猪21天断奶，结果显示三种日粮并未影响哺乳母猪体重或背标在哺乳期间的变化，乳成分和仔猪生长性能也没有显著差别，断奶-配种间隔也无差异(Velayudhan and Nyachoti, 2017)。研究人员认为，哺乳母猪日粮配比30%的卡诺拉菜粕不会影响母猪的繁殖性能和仔猪的生长性能，后续的研究进一步证实，卡诺拉菜粕在哺乳母猪日粮的适配比例是30%(Velayudhan et al., 2018)。

还有一个母猪试验，从妊娠第7天直到哺乳结束，试验日粮用卡诺拉菜粕分别替代0、50%或100%的豆粕，菜粕在妊娠母猪和哺乳母猪日粮分别占比23.3%和35.1%(Liu et al., 2018)，菜粕日粮的仔猪成活率显著高于豆粕日粮，但断奶-配种间隔比豆粕日粮稍微长些(表11)。

参数	豆粕	卡诺拉菜粕/豆粕	卡诺拉菜粕	P值
母猪数	40	37	37	
平均胎次	2.33	2.32	2.33	
体重损失, kg	28.2	27.2	32.8	0.22
窝产活仔数	12.5	11.9	12.2	0.76
出生窝重, kg	18.7	19.1	19.2	0.65
仔猪成活率, %	80.2	87.0	87.0	<0.05
断奶-配种间隔, 天	5.42	5.22	5.80	<0.05

¹Liu et al., 2018

表 11. 卡诺拉菜粕对母猪性能的影响¹



纯压榨卡诺拉菜粕对猪的价值

和预期的一样，纯压榨菜粕喂猪不会损失生产性能。15%纯压榨卡诺拉菜粕替代断奶仔猪日粮中15%的豆粕 (Seneviratne et al., 2011)，仔猪平均日增重和饲料效率相当(表12)。采用净能和可消化氨基酸配方体系，在26-54日龄仔猪日粮分别配比5%、10%、15%和20%的卡诺拉菜粕，逐步替代配方中的豆粕，随卡诺拉菜粕比例增加，粗蛋白和能量的全消化道表观消化率线性下降，但仔猪的生长性能没有差异 (Landro et al., 2012)。

文献	配比, %	性能	纯压榨卡诺拉菜粕	豆粕	P值
Landro et al., 2011	5	平均日增重, g	643	661	0.420
		重/料	0.71	0.71	0.758
	10	平均日增重, g	642	661	
		重/料	0.73	0.71	
	15	平均日增重, g	640	661	
		重/料	0.71	0.71	
20	平均日增重, g	648	661		
	重/料	0.72	0.71		
Landro et al., 2015	20	平均日增重, g	455	454	0.933
		重/料	0.71	0.72	0.757
Seneviratne et al., 2010	7.5	平均日增重, g	906	931	0.001
		重/料	0.49	0.48	0.627
	15	平均日增重, g	909	931	
		重/料	0.49	0.48	
	22.5	平均日增重, g	866	931	
		重/料	0.49	0.48	
Seneviratne et al., 2011	15	平均日增重, g	445	469	0.870
		重/料	0.72	0.71	0.323

表 12. 纯压榨卡诺拉菜粕对仔猪生长性能的影响

卡诺拉油菜籽与芥花油对猪的价值

芥花油通常是经济的能量来源，适用于猪各个生长和发育阶段，也用来抑制扬尘和改善饲料混合均匀度。卡诺拉油菜籽既是能量也是蛋白质来源，粉碎的菜籽在配方中占比通常不超过10%，否则会导致胴体脂肪软化 (Kracht et al., 1996)。尽管热处理会提高菜籽的营养价值，但过度热处理会降低氨基酸的消化率，未经热处理的菜籽饲喂效果不错。不适宜榨油厂加工的菜籽要特别留意，做配方前有必要测定其营养成分。据估计，卡诺拉油菜籽的净能为3,560千卡/公斤(干基)，由于配比超过10%引起采食量下降，致使净能有所低估 (Montoya and Leterme, 2010)。



卡诺拉菜粕与肠道健康

大量证据支持应用卡诺拉菜粕维持猪肠道健康。部分纤维在肠道中选择性发酵，从而改变胃肠道微生物菌群组成和活性。这些成分被称为益生元，具有保健功能，能帮助肠道抵御病原体的挑战。此外，硫代葡萄糖苷分解产生的活性物质具有抑制细菌或真菌的作用 (Dufour et al., 2015)。

哺乳母猪试验显示，卡诺拉菜粕日粮相比豆粕日粮，肠道多产乳酸，乳酸菌群更丰富 (Velayudhan et al., 2018)，卡诺拉菜粕替代豆粕，增加了仔猪肠道乳酸菌和肠球菌的丰度 (Mejicanos et al., 2017)。

北达科他州立大学的试验证实，卡诺拉菜粕日粮有益于断奶仔猪。小猪日粮配比20%卡诺拉菜粕，改善了肠道微生物菌群，减少了炎症反应 (Hong et al., 2020)。后续试验在第3天用大肠杆菌攻毒20天后结束，饲喂豆粕日粮的仔猪增重是抗生素治疗组的67%，用20%卡诺拉菜粕替代豆粕，饲喂卡诺拉日粮的仔猪增重是抗生素治疗组的82% (Hong et al., 2021)，表明卡诺拉菜粕日粮有效缓解了大肠杆菌挑战 (表13)。图2体现卡诺拉菜粕日粮饲养效果的一致性。

参数	负对照	正对照	配比20%卡诺拉菜粕
	豆粕 + 攻毒	豆粕 + 攻毒 + 抗生素	卡诺拉菜粕 + 攻毒
增重, g/天	293	434	357
采食量, g/天	350	513	435
重/料	0.83	0.85	0.83

表 13. 大肠杆菌攻毒前后卡诺拉菜粕日粮对小猪生长性能的影响 (Hong et al., 2021)

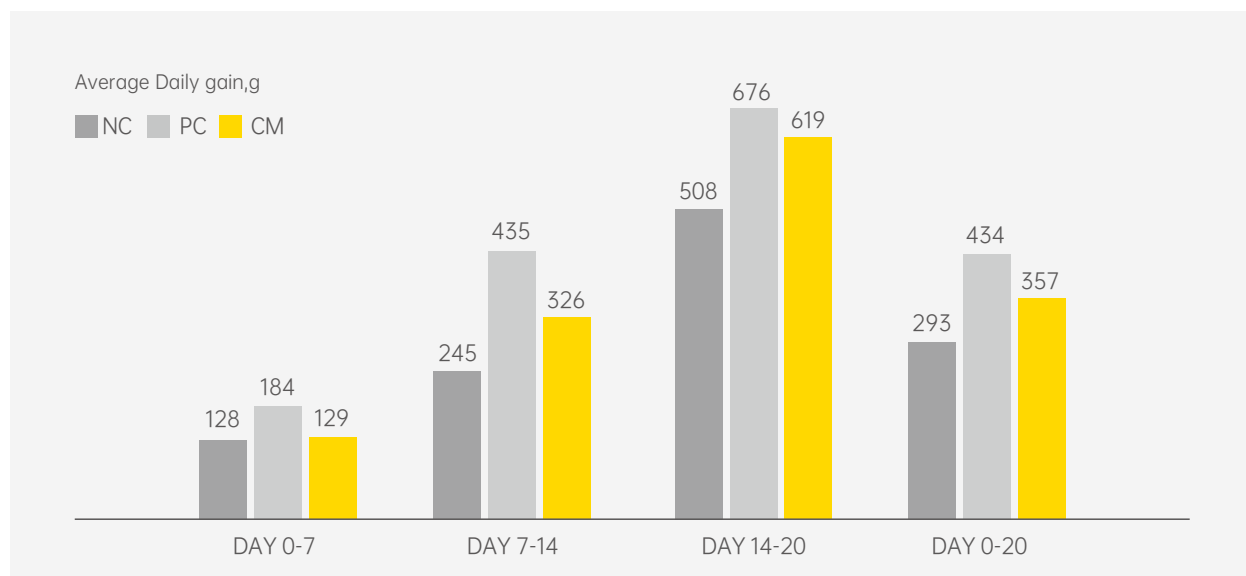


图 2. 攻毒试验仔猪日增重 (NC= 负对照, PC= 正对照, CM= 卡诺拉菜粕)



CH.5 POULTRY

第五章

卡诺拉菜粕 对家禽的价值

世界各地都在用卡诺拉饲养各类家禽。卡诺拉菜粕的氨基酸成分很特别，是豆粕等其他蛋白质饲料的替代品或有效补充。家禽日粮强调氨基酸平衡，卡诺拉菜粕在肉鸡日粮可以替代其他蛋白质饲料，在蛋鸡日粮也能体现其价值。必须以可消化氨基酸为基础配制日粮，以确保卡诺拉菜粕日粮达成最佳效能。





卡诺拉菜粕在家禽日粮的配比

类别 / 阶段	配比
雏鸡	配比超过 20% 可能降低采食量
肉鸡青年期	配比 30% 性能最佳
肉鸡育成期	配比 40% 性能最佳
蛋鸡	配比超过 24% 未见报道
肉种鸡	配比 30% 性能最佳, 超过 30% 未见报道
火鸡雏鸡	配比 24% 性能最佳, 超过 24% 未见报道
火鸡青年期	配比 24% 性能最佳, 超过 24% 未见报道
火鸡育成期	配比 24% 性能最佳, 超过 24% 未见报道
雏鸭	配比 10% 性能最佳, 需更多试验验证
鸭生长期	配比 21% 性能最佳, 超过 21% 未见报道
雏鹅	未见报道
鹅生长期	配比 16% 性能最佳, 超过 16% 未见报道
鹌鹑生长期	配比 15% 性能最佳
鹌鹑产蛋期	18.5% 配比生产性能最佳, 超过 18.5% 未见报道
鸵鸟	配比 20% 生产性能最佳 (仅有一个饲养试验)

盈利能力

多数学术研究以动物生产率为基础比较饲料养分, 而商业化应用则综合多种因素核算单位收益的成本, 包括原料成本、生产组织、健康状况和成活率。卡诺拉菜粕饲喂家禽不一定总能获得最好的增重效率, 但日粮中配比卡诺拉菜粕可能降低单位生产成本。

可持续性

一项评估速生和慢长肉鸡试验证明, 肉鸡很容易适应替代豆粕的日粮, 详细对比了包括卡诺拉菜粕在内的几个替代豆粕的植物性蛋白质饲料 (Berger et al., 2021)。数据显示, 卡诺拉菜粕替代豆粕增加了采食量, 导致生产成本略有增加 (不超过 2%), 但生产系统的温室气体排放大幅减少, 这可能与生产或获得豆粕的生产系统相关。现实情况可能并非始终如此, 更多的研究数据能帮助更准确地预测卡诺拉菜粕在家禽生产体系的可持续性。

适口性与采食量

已证明鸟类厌恶苦味(Yoshida et al., 2022), 普通菜粕硫代葡萄糖苷的苦味导致采食量下降(Khajali and Slominski, 2012)。

一般说来, 采用有效氨基酸配制日粮并增加卡诺拉菜粕配比, 家禽可以保持适当的采食量。饲养试验表明, 肉鸡和火鸡在育雏期间, 卡诺拉菜粕配比不超过20%, 鸭、鹅和鹌鹑这些种类研究较少, 配比应限制在10%。在生长后期, 家禽很容易耐受配比30-40%卡诺拉菜粕的日粮。

适当的配方可允许卡诺拉菜粕占比20%, 而不影响蛋鸡的采食量(Oryschak and Beltranena, 2013; Rogiewicz et al., 2015); 肉鸡育雏阶段的配方也能容纳20%的卡诺拉菜粕, 其采食量维持在正常水平(Naseem et al., 2006), 青年鸡配比高达30%的卡诺拉菜粕, 也不影响其采食量(Newkirk and Classen, 2002; Ramesh et al., 2006)。

蛋白质与氨基酸

在家禽日粮大量应用卡诺拉菜粕的最好办法是平衡日粮有效氨基酸, 广泛的试验研究确定了预榨浸提卡诺拉菜粕氨基酸的标准回肠消化率(SID), 表1和表2分别列举了肉鸡、蛋鸡、火鸡和鸭的标准回肠消化率。

¹Adewole et al., 2017; Agyekum and Woyengo, 2022; Ariyibi, 2019; Chen et al., 2015; Gallardo et al., 2017; Kim et al., 2012; Kong and Adeola, 2013; Osho et al., 2019; Park et al., 2019, Ross et al., 2019
²41次测定平均值

氨基酸	平均值 ² , %	标准差
必需氨基酸		
精氨酸	87.23	2.33
组氨酸	76.51	11.31
异亮氨酸	82.66	3.71
亮氨酸	83.68	2.58
赖氨酸	79.32	3.06
蛋氨酸	88.93	2.10
苯丙氨酸	83.89	2.21
苏氨酸	76.48	3.68
色氨酸	87.15	5.18
缬氨酸	78.85	3.94
非必需氨基酸		
丙氨酸	82.96	3.04
天冬氨酸	77.59	4.17
胱氨酸	76.47	3.77
谷氨酸	89.00	3.54
甘氨酸	78.80	4.08
脯氨酸	77.45	3.31
丝氨酸	80.51	4.73
酪氨酸	82.66	5.28

表 1. 肉鸡对卡诺拉菜粕氨基酸的标准回肠消化率¹

研究发现肉鸡、蛋鸡和公鸡对卡诺拉菜粕氨基酸表观回肠消化率没有差异(Huang et al., 2006), 但并非所有饲料原料都是如此(Adedokun et al., 2009; Huang et al., 2006)。因此, 表中所列数值可能有助于推断其他家禽种类的标准回肠消化率。

氨基酸	蛋鸡 ¹	火鸡 ²	鸭 ³
必需氨基酸			
精氨酸	88.23	88.57	85.30
组氨酸	82.97	79.67	81.75
异亮氨酸	77.70	76.29	78.40
亮氨酸	80.63	78.51	83.50
赖氨酸	80.60	79.86	75.50
蛋氨酸	88.67	84.19	88.60
苯丙氨酸	81.70	83.49	84.00
苏氨酸	73.50	75.13	74.60
色氨酸	82.30	95.00	87.40
缬氨酸	77.73	74.39	77.55
非必需氨基酸			
丙氨酸	80.00	81.83	80.05
天冬氨酸	77.20	80.92	74.90
胱氨酸	77.67	73.59	79.80
谷氨酸	86.75	88.07	85.15
甘氨酸	76.70	82.01	75.55
脯氨酸	75.70	75.68	83.10
丝氨酸	75.60	80.04	82.05
酪氨酸	78.30	79.02	80.45

表 2. 蛋鸡、火鸡和鸭对卡诺拉菜粕氨基酸的标准回肠消化率, %

¹ 4次测定平均值, Goudarzi et al., 2017; Oryschak et al., 2020.

² 28次测定平均值, Adedokun et al., 2008; Koslowski et al., 2011; Koslowski et al., 2018; Zhang et al., 2020.

³ 30次测定平均值, Kong and Adeola, 2013; Zhang et al., 2020.

肉鸡对纯压榨卡诺拉菜粕的标准回肠消化率(SID)收录在表3。鉴于肉鸡、蛋鸡、火鸡和鸭对预榨浸提卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠消化率相似, 表3数据虽来源于肉鸡试验, 但也适用于其他家禽种类, 除非有更新的研究指明特定家禽种类。

氨基酸	平均值 ² , %	标准差
必需氨基酸		
精氨酸	85.49	4.69
组氨酸	74.97	12.14
异亮氨酸	80.13	7.85
亮氨酸	81.41	3.96
赖氨酸	80.79	4.46
蛋氨酸	87.60	4.09
苯丙氨酸	83.00	4.29
苏氨酸	77.43	4.30
色氨酸	83.27	8.37
缬氨酸	78.79	4.53
非必需氨基酸		
丙氨酸	79.56	5.49
天冬氨酸	80.04	7.72
胱氨酸	87.01	6.18
谷氨酸	80.57	4.87
甘氨酸	76.84	3.97
脯氨酸	79.97	3.73
丝氨酸	77.93	6.94
酪氨酸	79.56	5.49

表 3. 肉鸡对纯压榨卡诺拉菜粕氨基酸的标准回肠消化率¹

¹ Agyekum and Woyengo, 2022; Bryan et al., 2019; Park et al., 2019; Kong and Adeola, 2016; Toghyani et al., 2014; Woyengo et al., 2010

² 19次测定平均值

能量

对家禽而言，卡诺拉菜粕的能量低于豆粕。在肉鸡日粮中，能量价值非常重要，卡诺拉菜粕的配合比例可能受到限制。如果无法配合能量饲料，基于最低成本的蛋鸡和火鸡早期高蛋白日粮，有时可能会限制卡诺拉菜粕在配方所占比例。

表4收录了关于预榨浸提卡诺拉菜粕表观代谢能的测定结果，其中包括已不再种植的老品种，能量变异也与卡诺拉油菜种植区域和季节有关。测定时采用的参照日粮、计算方法(差异或回归)也会导致表观代谢能的变异(Veluri and Olukosi, 2020; Wu et al., 2020)，菜粕的物理性状和加工工艺也会影响菜粕的能量价值(Khalil et al., 2021)。

种类	文献	原样	干基
肉鸡	Adewole et al, 2017	1777	2019
	Agyekum and Woyengo, 2022	1608	1909
	Chen et al., 2015	1983	2254
	Gallardo et al	1822	2071
	Gorski et al, 2017	1851	2217
	Jayaraman, 2016	2144	2437
	Jia et al., 2012	1810	2057
	Rad-Spice, 2018	1834	2084
	Rahmani et al,	1789	2032
	Wise and Adeola, 2022	1763	2003
	Woyengo et al., 2010	1584	1801
	Zhang and Adeola, 2017	2011	2286
	Zhong and Adeola, 2019	1689	1919
蛋鸡	Jia et al., 2012	1936	2200
	Oryschak et al, 2020	1928	2192
火鸡	Kozlowski et al., 2018	1886	2143
	Jia et al., 2012	1766	2007
	Noll et al., 2017	2010	2284
鸭	Wickramasuriya, 2015	1885	2142
鹌鹑	Mandal et al., 2005	1852	2105

表 4. 预榨浸提卡诺拉菜粕表观代谢能 (AMEn) - 家禽, 千卡 / 公斤

菜粕来源不同，菜粕中油分含量也有差别，也影响菜粕的能量价值。纯压榨卡诺拉菜粕的油分含量高，因而表观代谢能也高(表5)。

种类	文献	原样	干基	油分%, 干基
肉鸡	Agyekum and Woyengo, 2022	1994	2265	15.3
	Bryan et al, 2019	2623	2997	11.4
	Bryan et al., 2019	2917	3314	15.9
	Sessingnong et al., 2022	2043	2322	-
	Toghyani et al., 2014	2258	2566	-
	Woyengo et al., 2010	2370	2694	12
	Zhong and Adeola, 2019	2584	2937	18.1
蛋鸡	Oryschak et al, 2020	2556	2904	13.2

表 5. 纯压榨卡诺拉菜粕表观代谢能 (AMEn) - 家禽, 千卡 / 公斤

饲料酶提升能量价值

家禽日粮中添加饲料酶很常见，尤其是大麦、小麦日粮，已证明饲料酶能提高碳水化合物的消化率。卡诺拉菜粕含有很大一部分难被家禽消化的细胞壁成分，曼尼托巴大学为此做了广泛研究，以确定细胞壁的成分及非淀粉多糖酶对其消化的能力。在肉鸡日粮，添加复合酶(纤维素酶、葡聚糖酶、果胶酶、纤维素酶、甘露聚糖酶和乳糖酶)，提高了卡诺拉菜粕中非淀粉多糖的全消化道消化率，但未能改善其他养分的消化率或肉鸡的生产性能(Meng and Slominski, 2005)。饲喂配比卡诺拉菜粕和多糖酶的日粮，以确定多糖酶对表观代谢能(AMEn)的影响，发现AMEn增加了6%(Jia et al., 2012)，后来估算多糖酶使卡诺拉菜粕的能量价值提高了8%(Gallardo et al., 2017)，后续试验也见证并报告多糖酶将卡诺拉菜粕AMEn提高了6.6%(Rad-Spice, 2018)。最近的试验结果显示，多糖酶使卡诺拉菜粕非淀粉多糖的消化率由0提高到20%，肉鸡体重增加了5%(Niu et al., 2022)。尽管数据并不完全确定，但多糖酶适度提高了肉鸡对卡诺拉菜粕的消化率，同时也提高了其他饲料成分的消化率。



脂肪

卡诺拉菜粕的油分高于其他许多植物蛋白饲料，油分对其能量价值贡献不少(Newkirk, 2011)。肉鸡对芥花油和卡诺拉油菜籽油分的消化率一样(Barekatain et al., 2015)。

矿物质与维生素

第二章已报告了卡诺拉菜粕矿物质和维生素的概况，这些真实数据可用作配方指南。

磷

磷是各类家禽的重要营养素，卡诺拉菜粕富含磷。过去，人们认为卡诺拉菜粕中的磷只有非植酸磷可用，大约是总磷的35%。回肠消化率测定显示，卡诺拉菜粕中47%的磷可被家禽消化(Mutucumarana et al., 2015)。采用公鸡精准饲喂和生物测定技术，发现卡诺拉菜粕采食量接近公鸡营养需要时，磷的存留率为总磷的44%，但采食量超过公鸡营养需要时，磷的存留率会下降，研究人员建议家禽对卡诺拉菜粕磷的生物利用率保持38%比较适当(Munoz et al., 2018)。

植酸酶已被证明能有效提高普通菜粕磷的生物利用率(Czerwiński et al., 2012)，最近的肉鸡试验证实植酸酶也能有效提高卡诺拉菜粕磷的生物利用率。澳大利亚的一项试验在卡诺拉菜粕日粮添加植酸酶，使得磷的利用率由32%提升到52%，同时添加植酸酶和木聚糖酶，钙的利用率提升到69%(Moss et al., 2018)，还有人指出，植酸酶使肉鸡对卡诺拉菜粕磷的消化率提高了40%(David et al., 2021)。

阴阳离子平衡

配制家禽日粮时通常会平衡阴阳离子，日粮配方也会做到离子平衡。卡诺拉菜粕离子平衡值为负，而且硫含量高，会干扰钙的吸收。若在卡诺拉菜粕日粮中额外补钙，需要小心过多的钙抑制采食量，补充碳酸氢钾是更好的选择。

预榨浸提卡诺拉菜粕对家禽的价值

肉鸡

与普通菜粕不同，加拿大出产的卡诺拉菜粕仅有微量硫代葡萄糖苷，配方中不必担心抗营养物质，也无必要限制其在配方中所占份额。

与豆粕相比，卡诺拉菜粕钾含量低而硫含量高(Khajali and Slominski, 2012)。早先的饲养试验指出，肉鸡采食量与日粮阴阳离子平衡有关(Summers and Bedford, 1994)。现在的做法是根据阴阳离子平衡制定配方，添加碳酸钾或氯化钠达到离子平衡。对肉鸡营养需要的了解越来越多，配方技术日益精湛，允许在肉鸡日粮配置更多的卡诺拉菜粕。

此外，依据卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠消化率配制日粮，肉鸡增重几乎与其他蛋白质饲料相同，生长期肉鸡更是如此。研究表明，肉鸡日粮最多可配比30%卡诺拉菜粕。在小鸡(1-21日龄)日粮分别配比0、10、20、30和

40%卡诺拉菜粕，配比超过30%时，由于采食量下降，导致增重减少；在生长期(21-37日龄)日粮分别配比0、10、20和30%卡诺拉菜粕，肉鸡采食量和平均日增重没有差别(Gorski et al., 2017)。在7-35日龄，日粮分别配比0、10、20、30和40%卡诺拉菜粕，肉鸡增重速率优于豆粕日粮，配比40%卡诺拉菜粕的增重速率有所下降，但与配比40%豆粕日粮的增重速率相当(Gopinger et al., 2014)。饲养试验增加卡诺拉菜粕配比梯度，1-7日龄配比0-15%，7-14日龄配比0-18%，14-21日龄配比0-25%，21-28日龄配比0-35%，卡诺拉菜粕配比梯度增加并未影响肉鸡生长性能(Ariyibi, 2019)。由此看来，0-7日龄配比20%、7-14日龄配比30%、14日龄以上配比40%卡诺拉菜粕是有可能的，如果配制得当，可以替代肉鸡日粮中的豆粕(Rad-Spice et al., 2018)。

蛋鸡

卡诺拉菜粕也常用于蛋鸡日粮，且经济有效。与肉鸡日粮配方一样，蛋鸡日粮配方也需依据卡诺拉菜粕氨基酸标准回肠消化率。早期的研究以粗蛋白为基础配制日粮，用卡诺拉菜粕替代豆粕，导致日粮配方赖氨酸不足，蛋重降低(Kaminska, 2003)，后续研究也确认赖氨酸不足导致蛋重降低的事实(Novak et al., 2004)，研究人员将赖氨酸摄入量从860毫克/天增加到959毫克/天，观察到蛋重由59.0克增加到60.2克。有个过时的观念需要纠正，褐壳蛋鸡饲喂卡诺拉菜粕会导致鸡蛋带有鱼腥味，这与鸡种遗传因素有关，鸡种改良已解决了这一问题。

蛋鸡饲养试验证实，日粮配比20%卡诺拉菜粕对产蛋率、母鸡健康、鸡蛋品质和鸡蛋脂肪酸组成没有负面影响。如图1所示，为期36周试验期，蛋重和产蛋率与对照组没有明显差异，母鸡肝脏出血情况也没有差异，鸡蛋也未尝到鱼腥味(Oryschak and Beltranena, 2013)。类似的研究佐证日粮配比15-20%卡诺拉菜粕，蛋鸡生产性能颇佳(Rogiewicz et al., 2015)。一项为期16周的饲养

试验，产蛋母鸡33-49周龄，日粮配比0、8、16和24%卡诺拉菜粕，其采食量、产蛋率、蛋重及母鸡体重都与对照组没有差异(Gorski, 2015)。

卡诺拉菜粕与蛋鸡生产性能

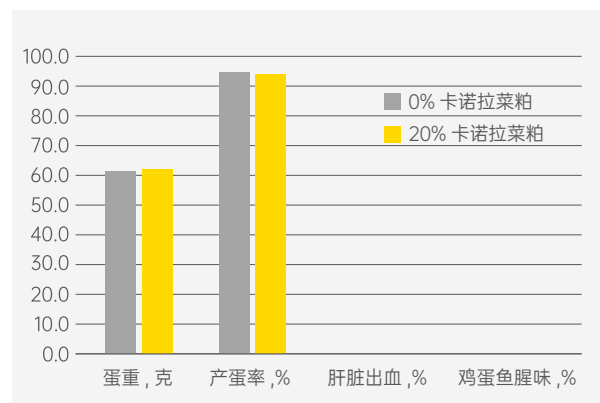


图1. 蛋鸡日粮配比20%卡诺拉菜粕对生产性能的影响 (Oryschak and Beltranena, 2013)



达尔豪斯大学的一项试验，给褐壳蛋鸡饲喂以豆粕为主要蛋白质来源或10%及20%卡诺拉菜粕日粮，分析蛋鸡在30-41周龄、42-49周龄、50-61周龄、62-78周龄的生产性能，其产蛋率、饲料效率及死淘率均无显著差异，鸡蛋品质或母鸡体重在不同日粮组也未显示差异(Savary et al., 2017)。该研究小组后续做了类似饲养试验，并证实了前述试验结果(Savary et al., 2019)。

最近的一项综合试验清楚地表明，在褐壳蛋鸡日粮配置预榨浸提卡诺拉菜粕，配方中占比20%，在36周产蛋期生产性能优异(Oryschak et al., 2020)。前述试验结果说明，依据可消化氨基酸配制日粮，可以在蛋鸡饲料配置20%卡诺拉菜粕，对产蛋率、蛋重、鸡蛋品质或鸡蛋脂肪酸组成没有负面影响。

肉种鸡

蛋鸡的饲养试验结果适用于种鸡。卡诺拉菜粕饲喂肉种鸡的研究资料有限，其高蛋白高纤维成为肉种鸡体重控制的理想饲料。早期的试验表明，卡诺拉菜粕对来航鸡的受精率和种蛋孵化率没有负面影响(Kiiskinen, 1989; Nasser et al., 1985)。一项饲养试验针对普通菜粕，硫代

葡萄糖苷含量未知，日粮配置0、10、20或30%普通菜粕，数据显示产蛋率、蛋重或雏鸡品质均未受到普通菜粕及其配比的影响(Ahmadi et al. (2007)。基于大量蛋鸡或其他家禽的研究结果，肉种鸡日粮配置卡诺拉菜粕合情合理。

火鸡

人们早就知道，卡诺拉菜粕是生长期火鸡的优质蛋白质，给生长和育肥期火鸡配制较多卡诺拉菜粕也是通行的做法，关键是确保日粮氨基酸的平衡。如果配方未能维持等能和等量必需氨基酸，配置20%卡诺拉菜粕会导致生长和饲料效率下降，若额外添加脂肪并且氨基酸水平保持对等，卡诺拉菜粕日粮的性能表现等同或优于对照组的豆粕日粮(Waibel, 1992)。与其他畜禽种类一样，依据可消化氨基酸配制日粮非常重要。

为期8周的饲养试验证实，幼龄期和生长期火鸡日粮配置20%卡诺拉菜粕，生长速度与豆粕日粮相当，但幼龄期料重比略高于豆粕日粮，分别是1.43和1.36；若在该日粮添加复合碳水化合物酶，料重比可降到1.37，采

食量、平均日增重及饲料效率与豆粕日粮相当(Kozlowski et al., 2018)。类似的试验给幼龄期火鸡配制0、8、16或24%的卡诺拉菜粕日粮，观测到生产性能与对照组没有差异(Noll et al., 2017)。后续的试验只在幼龄火鸡最为敏感的前3周展开，日粮配置24%的卡诺拉菜粕对幼龄火鸡的生长发育无不良影响(Noll et al., 2017)。

配方实践中，卡诺拉菜粕在火鸡日粮的配比不超过20%，这种情况下，要确保日粮电解质平衡在适当的范围。卡诺拉菜粕的电解质平衡(Na+K-Cl)约为307mEq/kg，但要考虑到菜粕硫的贡献。若采用电解质平衡方程(Na+K)-(Cl+S)，卡诺拉菜粕的电解平衡约为100mEq/kg(Khajali and Slominski, 2012)。

鸭和鹅

鸭和鹅是仅次于鸡和火鸡的第三大禽肉来源，因其蛋和羽毛格外受到重视。卡诺拉菜粕通常也用来饲喂鸭和鹅，目前还未见到因菜粕而导致问题的报道。

鸭的第一限制性氨基酸是蛋氨酸，卡诺拉菜粕氨基酸的组成有利于鸭日粮的氨基酸平衡(Wickramasuriya et al., 2015)。如表2所列，鸭对卡诺拉菜粕和豆粕氨基酸的消化率相当(Kluth and Rodehutschord, 2006)。与豆粕比较，卡诺拉菜粕富磷也是一个理想的属性。

鉴于普通菜粕硫代葡萄糖苷浓度较高，在公鸭日粮的配比受到限制，雏鸭和生长期鸭日粮分别配比7%和21%的普通菜粕并不影响其生长发育(Bernadet et al., 2009)。这也说明卡诺拉菜粕等量配比也适用于鸭。

若在雏鸭日粮分别配置0、5、10、15或20%双低菜粕(硫代葡萄糖苷25微摩尔/克，是卡诺拉菜粕硫代葡萄糖苷含量的5倍)，从7-21日龄，随双低菜粕配比增加，料重比线性降低，意味着饲料效率逐步改善(Zhu et al. (2019)，建议在雏鸭日粮配置7%双低菜粕(Bernadet et al., 2009)。

与其他家禽相比，针对鹅的研究很少，有趣的是鹅比其他家禽有更强的消化能力，似乎可以更高效地消化卡诺拉菜粕(Jamroz et al., 1992)。在35-70日龄的鹅日粮，等氮配比0、4、8、12或16%普通菜粕，梯度替代豆粕，鹅的采食量、生长速度及饲料效率没有显著差异，普通菜粕日粮对屠宰率和胴体性状也无不良影响(Fu et al., 2021)。试验结果指出，生长育肥鸭日粮可配置16%卡诺拉菜粕。

鹌鹑

饲养鹌鹑既为蛋也为肉。产蛋鹌鹑46-56周龄，其日粮配比10、20或30%卡诺拉菜粕，随配比增加，产蛋性能下降，但配比10%卡诺拉菜粕不影响生产性能，研究人员认为卡诺拉菜粕替代豆粕，替代比例不应超过1/3(Saki et al., 2017b)。早期的研究用卡诺拉菜粕分别替代产蛋鹌鹑日粮中0、25或50%的豆粕，卡诺拉菜粕在日粮中占比分别为0、9.28或18.5%，为期126天的饲养试验，鹌鹑体重变化、饲料效率、产蛋率和蛋重没有显著差异(Sarıçiçek et al., 2005)。

	Diet 日粮		
	豆粕	卡诺拉菜粕配比低	卡诺拉菜粕配比高
替代豆粕比例, %	0	25	50
卡诺拉菜粕占比, %	0	12.15	24.3
不添加复合碳水化合物酶			
增重, g	150	140	132
采食量, g	761	751	740
料/重	5.06	5.22	5.59
添加复合碳水化合物酶			
增重, g	143	142	147
采食量, g	738	753	755
料/重	5.16	5.13	5.16

¹Sancicek et al, 2015

表 6. 卡诺拉菜粕逐渐替代豆粕对鹌鹑生长发育的影响¹



为期6周的生长试验，给鹌鹑配制等氮日粮，卡诺拉菜粕逐渐替代豆粕，分别配比0、2.5、5.0、12.5或17.5%，鹌鹑增重没有差异，但卡诺拉菜粕在配方占比17.5%时，鹌鹑采食量最少(Minisi and Mlambo, 2018)。另一个生长期试验对比卡诺拉菜粕与豆粕(表6)，卡诺拉菜粕替代日粮中0、25或50%的豆粕，卡诺拉菜粕在配方分别占0、12.15或24.3%，同时观察植酸酶和复合碳水化合物酶对日粮消化率的影响，若菜粕日粮不加酶，替代50%豆粕时生长率低于对照组，屠宰率和胴体特征并没有因日粮而不同(Saricicek et al., 2005)。以上两个试验说明，生长期鹌鹑日粮可以配置15%的卡诺拉菜粕。

鸵鸟

一个新颖的饲养试验(Brand et al., 2020)，卡诺拉菜粕逐渐替代配方中的豆粕和小麦，将75日龄的鸵鸟饲养到337日龄，达到上市体重(表7)。

	饲养程序				
	1	2	3	4	5
幼鸟期日粮(76-146天)					
卡诺拉菜粕, %	0	7.8	15.6	23.4	31.3
豆粕, %	17.9	13.4	9.0	4.5	0
生长期日粮(147-230天)					
卡诺拉菜粕, %	0	5.0	10.0	15.0	20.0
豆粕, %	13.5	10.0	6.7	3.7	0
育成期日粮(231-377天)					
卡诺拉菜粕, %	0	5.0	10.0	15.0	20.0
豆粕, %	10.4	7.9	5.2	2.6	0

¹Brand et al., 2020

表7. 卡诺拉菜粕替代豆粕对鸵鸟生长发育的影响¹

从试验开始到结束，采食量和平均日增重没有差异。幼鸟期配比15.0%和23.4%菜粕日粮增加了平均日增重，虽增重趋势没有延续至生长期或育成期，但卡诺拉菜粕替代豆粕及在配方占比对净膛重和屠宰率没有显著影响。

纯压榨卡诺拉菜粕对家禽的价值

家禽日粮多用预榨浸提卡诺拉菜粕，但纯压榨菜粕的能量更高，人们对纯压榨菜粕越来越感兴趣。阻碍纯压榨菜粕广泛应用的一个因素是油分，且随来源不同也有变化(Woyengo et al., 2010)。因此，了解饲料中油分比例和能量水平非常重要。

肉鸡

多项研究支持肉鸡日粮配置纯压榨卡诺拉菜粕。达尔豪斯大学的研究评估了纤维消化酶对纯压榨菜粕的价值，菜粕替代豆粕和玉米，在配方占比达到30%，纯压榨菜粕油分含量分别为10%和14%，配方能量随菜粕油分增加而增加，碳水化合物酶也提高了能值(Bryan et al., 2019a)。

雏鸡和青年期肉鸡日粮配置20%纯压榨卡诺拉菜粕，替代豆粕和玉米，并保持配方等氮等能，为期35天的饲养试验，肉鸡平均日增重和饲料转化率没有差异(Inglis et al., 2021)。

产蛋鸡

一项饲养试验为期36周，评估了纯压榨或预榨浸提卡诺拉菜粕与豆粕的效果，试验日粮配置20%菜粕，母鸡产蛋率、体重变化在各处理间没有差异，纯压榨菜粕组的蛋料比略低，菜粕日粮增加了鸡蛋中单不饱和脂肪酸的比例(Oryschak et al., 2020)，与Savary等(2017; 2019)的试验结果一致。

淘汰母鸡

淘汰母鸡通常用于汤品和鸡肉质地要求更高的特色菜肴。一项探索性研究比较了豆粕和纯压榨菜粕对鸡肉营养特性的影响，试验日粮配置20%纯压榨卡诺拉菜粕，菜粕组母鸡产蛋48周，豆粕组母鸡产蛋40周，鸡肉感官品质没有差别，但菜粕组鸡肉饱和脂肪酸比豆粕组少，分别是34.0%和38.75，而Omega-3脂肪酸更多，分别是5.1%和3.4%(Semwogerere et al., 2019)。



芥花油对家禽的价值

卡诺拉油菜籽富含油分，可以作为能量饲料。收集主产区菜籽样品并做测试分析，油菜籽对生长期肉鸡的表现代谢能在4501-4791千卡/公斤，平均值4554千卡/公斤(干基)，表现代谢能的变化很大程度是因为菜籽油含量的变化，菜籽油含量40.8-47.9%(Toghyani et al., 2017)。最近也有学者测试菜籽的表现代谢能，结果与之前相似，以干物质计为4691千卡/公斤(Barekatin et al., 2015)。

卡诺拉油菜籽通常作为肉鸡的能量饲料，也是不饱和脂肪酸的极好来源。肉鸡日粮配置3%的脂肪，如牛油、亚麻籽油、玉米油、芥花油、澳洲坚果油或椰子油，肉鸡没有因脂肪来源不同而表现生长性能的差异，但鸡肉脂肪酸组成因日粮脂肪来源不同有很大差异，饲喂芥花油日粮的鸡肉组织中饱和脂肪酸浓度最低，且鸡肉Omega-3脂肪酸含量仅次于饲喂亚麻油日粮(Kanakri et al., 2018)。

芥花油亚油酸(Omega-6)与亚麻酸(Omega-3)的比例约为2:1，大豆油为7:1，玉米油为50:1。常见的去饱和酶能延长这两种脂肪酸，家禽体内的去饱和酶可以将亚麻酸延长为二十二碳六烯酸(DHA)，而过量的亚油酸会限制亚麻酸的转化(Cachaldora et al., 2008)。

所以，母鸡能够从亚麻酸合成DHA，鸡蛋就成为重要且经济的Omega-3脂肪酸来源。产蛋鸡基础日粮的脂肪酸组成就需要格外关注，日粮适当配置亚麻油或奇亚籽油作为亚麻酸的来源，就可以生产富含DHA的鸡蛋。芥花油在蛋鸡日粮既供应亚油酸，也供应亚麻酸，比其他动物油或植物油更有优势(Gonzalez-Esquerria and Leeson, 2001; Goldberg et al., 2016)。在蛋鸡玉米-豆粕基础日粮配置3-5%芥花油，鸡蛋DHA浓度8倍于不加油的日粮(Rowghani et al., 2007)。

卡诺拉菜粕与肠道健康

随化学促长剂在家禽业不断减少，越来越多的研究数据揭示了饲料组分和特定营养素对家禽健康的作用。多项饲养试验强调，卡诺拉菜粕可能有助于肠道健康和养分消化。

卡诺拉菜粕纤维在家禽盲肠被部分消化，产生挥发性脂肪酸(VFA)，特别是丁酸(Butyrate)，能抑制病原菌(Elnesr et al., 2020)，也为盲肠和大肠内细胞供应所需养分。火鸡日粮配置20%卡诺拉菜粕替代豆粕，肠道丁酸占VFA的比例发生了变化，若菜粕日粮添加复合碳水化合物酶，盲肠内容物VFA的浓度也会增加(Kozlowski et al., 2018)。生长期肉鸡日粮配置卡诺拉菜粕，试验观察到盲肠发酵程度更甚，而且盲肠内容物细菌组成和特征也有差异(Inglis et al., 2021)。

较早的研究表明，卡诺拉菜粕可能会改变家禽肠道内壁的完整性。在幼龄和生长期公鸡日粮分别配比0、10、20、30或40%卡诺拉菜粕，肠道粘膜内层的完整性没有丧失(Gopinger et al., 2014)。

佐治亚大学的研究人员最近开展了两项研究，采用艾美尔球虫和鼠伤寒沙门氏菌攻毒模型，评估预榨浸提和纯压榨菜粕及其硫代葡萄糖苷降解代谢物-异硫氰酸烯丙酯(AITC)的抑菌效果。两项研究均采用相同日粮：豆粕日粮作为对照，10%纯压榨普通菜粕，30%纯压榨普通菜粕，20%预榨浸提卡诺拉菜粕，500 ppm AITC和1000 ppm AITC。数据显示，各处理肉鸡生长速率有差别，但与艾美尔球虫攻毒无关；与豆粕和普通菜粕日粮比较，卡诺拉菜粕日粮的肠道通透性显著降低，而且40%要比20%卡诺拉菜粕日粮的肠道保护能力在数值上有所提高；AITC在降低肠道通透性方面也非常有效(Yadav et al., 2022a)。第二项研究在肉鸡孵化时用沙门氏菌攻毒，观察到沙门氏菌攻毒并未增加肠道通透性，配比30%普通菜粕日粮的肠绒毛最高，其他处理肠绒毛高度相当；攻毒后，豆粕日粮的死亡率最高(Yadav et al., 2022)。因此，卡诺拉菜粕在肉鸡感染艾美尔球虫时可能具有优势，在感染沙门氏菌的死亡率也较低，可能比豆粕更适合肉鸡。

CH.6 AQUACULTURE

第六章

卡诺拉菜粕

对水生动物的价值

卡诺拉菜粕已成为世界各地水生动物的蛋白质饲料。许多养殖鱼类是肉食性的，而鱼粉的天然来源逐渐枯竭，迫使行业寻求可替代鱼粉的植物性蛋白质，以满足水生动物生长繁育对蛋白质和氨基酸的需要。尽管面临许多挑战，卡诺拉菜粕的确适合许多水生动物。



卡诺拉菜粕在常见水生动物日粮的配合比例

种类	学名	配合比例, %
澳洲鲷	<i>Pagrus auratus</i>	60
青鱼	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	11
鲤	<i>Cyprinus carpio</i>	55
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	37
麦瑞加拉鲮	<i>Cirrhinus mrigala</i>	24
细鳞肥脂鲤	<i>Piaractus mesopotamicus</i>	19
尼罗罗非鱼	<i>Oreochromis niloticus</i>	33
苏氏圆腹鲢	<i>Pangasius sutchi</i>	30
南亚野鲮	<i>Labeo rohita</i>	20
银鲈	<i>Bidyanus bidyanus</i>	60
条纹鲮脂鲤	<i>Prochilodus lineatus</i>	8
团头鲂	<i>Megalobrama amblycephala</i>	35
大西洋鲑	<i>Salmo salar</i>	10
亚洲鲈	<i>Lates calcarifer</i>	30
军曹鱼	<i>Rachycentron canadum</i>	13
欧洲鲈	<i>Dicentrarchus labrax</i>	25
花鲈	<i>Lateolabrax japonicus</i>	15
卵形鲳	<i>Trachinotus ovatus</i>	16
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	20
淡水神仙鱼	<i>Pterophyllum scalare</i>	8
头立鱼	<i>MegalEporinus macrocephalus</i>	38
阳光鲈	<i>Morone chrysops</i>	20
凡纳滨对虾	White Leg	15
淡水虾	<i>Macrobracium</i>	30
锯缘青蟹	<i>Scylla serrata</i>	20

盈利能力与可持续性

地球上海洋鱼类资源不断枯竭，人口进一步增长，养殖鱼类为消费者提供优质蛋白质越来越重要，水产养殖业正在努力通过人工养殖减少对海洋捕捞的依赖，全球水产养殖业目前利用1500万吨海鱼为消费者供应3000万吨优质食品(表1)。

种类	捞出率	养殖量	野生海洋原料
鳊鱼	2.7	0.26	0.7
鲑鳟	2.5	2.54	6.4
海水鱼	1.6	2.55	4.1
海水和淡水甲壳类	0.7	5.48	3.8
其他淡水鱼	0.3	4.05	1.2
罗非鱼	0.2	3.00	0.6
鲤	0.1	12.17	1.2
总量	0.5	30.05	15.0

表 1. 几种选择养殖鱼类捞出率 (FIFO)¹, 百万吨

¹ <https://www.globalseafood.org/advocate/how-much-fish-is-consumed-in-aquaculture/>

许多与水产养殖影响环境的因素都与饲料有关，改变喂养方式可能减少该行业对全球变暖的影响 (Sherry and Koester, 2020)。可持续地增加和利用陆地、重新评估生产指标是实现这一目标的可能选项；就可持续性而言，最快的生长速度和最多的增重比也许不是最佳选择。

卡诺拉菜粕氨基酸符合许多水生动物的需要，可以部分替代养殖鱼类日粮中的鱼粉 (Albrektsen et al., 2022)。卡诺拉菜粕日粮的生产成本低于其他许多蛋白质饲料 (Kaiser et al., 2022)，随更多研究结果陆续发表，卡诺拉菜粕有机会支持可持续生产并提高水产养殖的盈利能力(表2)。

蛋白质饲料	全球产量, 百万吨	生产成本, 美元/吨
羽扇豆	1.0	453.7
豌豆	21.8	1313.4
卡诺拉/油菜	70.5	406.0
大豆	333.7	507.6
葵花籽	56.1	583.7
鱼粉	6.0 ²	1596.0

表 2. 蛋白质饲料及生产成本 (2019 年数据)¹

¹ Kaiser et al., 2022

² 提取鱼油后的鱼粉。

适口性与采食量

卡诺拉菜粕是水生养殖动物适口性很好的蛋白质。可溶性卡诺拉浓缩蛋白已成功用做低鱼粉日粮的诱食剂，在阳光鲈日粮中配比1%可溶性卡诺拉浓缩蛋白，显著地增加了采食量和体增重(Hill et al., 2013)。如第二章所述，卡诺拉菜粕硫代葡萄糖苷浓度已经很低，不再有早期研究中所发现的苦味。

卡诺拉菜粕在水生动物日粮的配制比例通常受到养殖鱼类营养需要的限制。比如肉食性鱼类对蛋白质的需求量很高，但对碳水化合物耐受性很低；而杂食性鱼类对碳水化合物的耐受性很好。表3显示，卡诺拉菜粕在一些具有重要商业价值的杂食性鱼类日粮，配合比例高达60%；当以生长速率作为主要考察指标时，在肉食性鱼类日粮中的配合比例仅限于30%或更低(表4)。

种类	学名	配比, %
杂食性海水鱼		
澳洲鲷 ¹	<i>Pagrus auratus</i>	60
杂食性淡水鱼		
青鱼 ²	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	11
鲤 ³	<i>Cyprinus carpio</i>	55
草鱼 ⁴	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	37
迈瑞加拉鲮 ⁵	<i>Cirrhinus mrigala</i>	24
细鳞肥脂鲤 ⁶	<i>Piaractus mesopotamicus</i>	19
苏氏圆腹鲶 ⁷	<i>Pangasius sutchi</i>	30
南亚野鲮 ⁸	<i>Labeo rohita</i>	20
银鲈 ⁹	<i>Bidyanus bidyanus</i>	60
条纹鲮脂鲤 ¹⁰	<i>Prochilodus lineatus</i>	8
团头鲂 ¹¹	<i>Megalobrama amblycephala</i>	35
尼罗罗非鱼 ¹²	<i>Oreochromis niloticus</i>	33

表 3. 卡诺拉菜粕在杂食性鱼类日粮的配合比例 (自 2000 年以来发表的研究报告)

¹Glencross et al., 2004a; ²Huang et al., 2012; ³Hussain et al., 2020; ⁴Veiverberg et al., 2010; Jiang et al., 2016; ⁵Parveen et al., 2012; ⁶Viegas et al., 2008; ⁷Van Minh et al., 2013; ⁸Iqbal et al., 2015; Umer and Ali, 2009; Parveen et al., 2012; Umer et al., 2011; ⁹Booth and Allen, 2003. ¹⁰Galdioli et al., 2002. ¹¹Zhou et al., 2018; ¹²Yigit and Olmez, 2009, Zhou and Yue, 2010; Luo et al., 2012; Mohammadi et al., 2016; Fangfang et al., 2014; Soares et al., 2001.

种类	学名	配比, %
肉食性海水鱼		
大西洋鲑 ¹	<i>Salmo salar</i>	10
尖吻鲈 ²	<i>Lates calcarifer</i>	30
军曹鱼 ³	<i>Rachycentron canadum</i>	13
欧洲海鲈 ⁴	<i>Dicentrarchus labrax</i>	25
花海鲈 ⁵	<i>Lateolabrax japonicus</i>	15
卵形鲳鲹 ⁶	<i>Trachinotus ovatus</i>	16
虹鳟 ⁷	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	20
肉食性淡水鱼		
淡水神仙鱼 ⁸	<i>Pterophyllum scalare</i>	8
头立鱼 ⁹	<i>Leporinus macrocephalus</i>	38
阳光鲈 ¹⁰	<i>Morone chrysops</i>	20

表 4. 卡诺拉菜粕在肉食性鱼类日粮的配合比例 (自 2000 年以来发表的研究报告)

¹Burr et al., 2013; Collins, et al., 2013; ²Ngo et al., 2015; ³Luo et al., 2012; ⁴Lanari and D'Agaro, 2005; ⁵Cheng et al., 2010; ⁶Kou et al., 2015; ⁷Thiessen et al., 2003; Thiessen et al., 2004; Yigit et al., 2012; Collins et al., 2012; Collins et al., 2013; ⁸Erdogan and Olmez, 2009; ⁹Galdioli et al., 2001; Soares et al., 2000; ¹⁰Webster et al., 2000.

蛋白质与氨基酸

对大多数鱼类而言，卡诺拉菜粕蛋白质的消化率很高。NRC(2011)没有将卡诺拉菜粕列入饲料原料，但给出了普通菜粕蛋白质的表观消化率，虹鳟为91%，尼罗/蓝罗非鱼为85%，军曹鱼为89%。奇努鲑(大鳞大马哈鱼)对卡诺拉菜粕蛋白质的消化率为85%，对大豆分离蛋白的消化率为84%，对豆粕蛋白质的消化率只有77%(Hojen et al. (1993)。表5和表6分别归纳和列举了2000年以来发表的关于卡诺拉菜粕蛋白质消化率的研究结果

种类	学名	消化率, %
杂食性海水鱼		
澳洲鲷 ¹	<i>Pagrus auratus</i>	83.0
黑线鳉 ²	<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	82.3
杂食性淡水鱼		
革胡子鲶 ³	<i>Clarias gariepinus</i>	89.8
斑点叉尾鮰 ⁴	<i>Ictalurus punctatus</i>	91.4
南亚野鲮 ⁵	<i>Labeo rohita</i>	49.9
银鲈 ⁶	<i>Bidyanus bidyanus</i>	83.0
尼罗罗非鱼 ⁷ (表3)	<i>Oreochromis niloticus</i>	82.0

表 5. 杂食性鱼类对卡诺拉菜粕蛋白质的消化率 (未添加消化酶)

¹ Glencross et al., 2004a; ² Tibbitts et al, 2004; ³ Elescho et al., 2021;

⁴ Kitagima and Fracalossi, 2011; ⁵ Hussain et al, 2015; ⁶ Allan et al, 2000;

⁷ Borgeson et al., 2006;.

种类	学名	消化率, %
肉食性海水鱼		
北极红点鲑 ¹	<i>Salvelinus alpinus</i>	72.8
大西洋鳕 ²	<i>Gadus morhua</i>	60.6
大西洋鲑 ³	<i>Salmo salar</i>	86.2
尖吻鲈 ⁴	<i>Lates calcarifer</i>	85.4
军曹鱼 ⁵	<i>Rachycentron canadum</i>	89.0
欧洲海鲈 ⁶	<i>Dicentrarchus labrax</i>	89.8
花鲈 ⁷	<i>Lateolabrax japonicus</i>	71.4
大西洋白姑鱼 ⁸	<i>Argyrosomus regius</i>	95.9
虹鳟 ⁹	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	88.3
条纹鲈 ¹⁰	<i>Morone saxatilis</i>	43.0
黄鳍鲷 ¹¹	<i>Acanthopagrus latus</i>	84.7
肉食性淡水鱼		
淡水神仙鱼 ¹²	<i>Pterophyllum scalare</i>	86.5
头立鱼 ¹³	<i>Leporinus macrocephalus</i>	78.7
西伯利亚鲟 ¹⁴	<i>Acipenser baerii</i>	61.0

表 6. 肉食性鱼类对卡诺拉菜粕蛋白质的消化率 (未添加消化酶)

¹ Burr et al., 2011; ² Erdogan et al., 2010; ³ Burr et al., 2011; ⁴ Ngo et al., 2015;

⁵ Zhou et al., 2004; Luo et al., 2012; ⁶ Lanari and D'Agaro, 2005; ⁷ Cheng et al., 2010;

⁸ Rodrigues Olim, 2012; Olim, 2012; ⁹ Mwachireya et al., 2000; Burel et al., 2000; Dalsgaard et al., 2012; Gaylord et al., 2008; Gaylord et al., 2010; Thiessen et al., 2004; Cheng and Hardy, 2002; Lee et al., 2020; ¹⁰ Gaylord et al, 2004 ; ¹¹ Wu et al, 2006;

¹² Erdogan and Olmez., 2010; ¹³ Goncalves et al., 2002; Goncalves 2004;

¹⁴ Mirzakhani et al., 2020.

种类	学名	消化率, %
杂食性海水鱼		
澳洲鲷 ¹	<i>Pagrus auratus</i>	52.7
黑线鳉 ²	<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	58.9
杂食性淡水鱼		
革胡子鲶 ³	<i>Clarias gariepinus</i>	74.6
斑点叉尾鲷 ⁴	<i>Ictalurus punctatus</i>	69.4
南亚野鲮 ⁵	<i>Labeo rohita</i>	49.9
银鲈 ⁶	<i>Bidyanus bidyanus</i>	51.9
尼罗罗非鱼 ⁷	<i>Oreochromis niloticus</i>	80.5

表 7. 杂食性鱼类对卡诺拉菜粕干物质的消化率 (未添加消化酶)

¹ Glencross et al., 2004a; ² Tibbetts et al., 2004; ³ Elescho et al., 2021;⁴ Kitagima and Fracalossi, 2011; ⁵ Hussain et al., 2015. ⁶ Allan et al., 2000; Allan et al., 2004;⁷ Bibi et al., 2020; Borgeson et al., 2006 Furura et al., 2001; Pezzato et al., 2002.

能量与纤维

相较于家禽和哺乳动物，水生动物日粮的蛋白能量比较高，饲料中粗蛋白水平通常高于家禽和家畜。肉食性鲑日粮的粗蛋白通常超过40%，杂食性或草食性鱼如鲤或罗非鱼，日粮粗蛋白常在25-30%。实践中，卡诺拉菜粕在肉食性鲑日粮的配合比例通常低于20%，而在杂食性或草食性鱼类如鲤或罗非鱼日粮，对粗蛋白的需求较低，卡诺拉菜粕配比可适当增加。

自2000年以来，发表了若干卡诺拉菜粕在鱼类饲料消化率的研究报告，表7和表8归纳了卡诺拉菜粕干物质的消化率，表9和表10列举了卡诺拉菜粕能量的消化率。消化率的变异很大程度上归因于世界各地养殖的鱼种类繁多，以及多样化的菜粕生产工艺。

卡诺拉菜粕能量会因脂肪含量而变化，加工工艺也会影响菜粕的营养价值。虹鳟对预榨浸提普通菜粕能量的消化率为69%，而对热处理普通菜粕能量的消化率为89%，可见能量消化率的变异很广泛(Burel et al., 2000)。

种类	学名	消化率, %
肉食性海水鱼		
北极红点鲑 ¹	<i>Salvelinus alpinus</i>	46.8
大西洋鳕 ²	<i>Gadus morhua</i>	60.6
大西洋鲑 ³	<i>Salmo salar</i>	76.2
尖吻鲈 ⁴	<i>Lates calcarifer</i>	41.2
军曹鱼 ⁵	<i>Rachycentron canadum</i>	48.0
欧洲海鲈 ⁶	<i>Dicentrarchus labrax</i>	71.2
花鲈 ⁷	<i>Lateolabrax japonicus</i>	40.0
大西洋白姑鱼 ⁸	<i>Argyrosomus regius</i>	44.1
虹鳟 ⁹	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	65.6
黄鳍鲷 ¹⁰	<i>Acanthopagrus latus</i>	33.5
肉食性淡水鱼		
淡水神仙鱼 ¹¹	<i>Pterophyllum scalare</i>	71.2
头立鱼 ¹²	<i>Leporinus macrocephalus</i>	63.8
西伯利亚鲟 ¹³	<i>Acipenser baerii</i>	76.4

表 8. 肉食性鱼类对卡诺拉菜粕干物质的消化率 (未添加消化酶)

¹ Burr et al., 2011; ² Tibbetts et al., 2004; ³ Burel et al., 2000; Dalgaard et al., 2012;⁴ Ngo et al., 2015; ⁵ Luo et al., 2012; ⁶ Iqbal et al., 2015; ⁷ Cheng et al., 2010;⁸ Rodrigues Olim et al., 2012; ⁹ Mwachireya et al., 2000; Burel et al., 2000; Dalgaard et al., 2012; Lee et al., 2020; ¹⁰ Wu et al., 2006. ; ¹¹ Erdogan and Olmez., 2010;¹² Goncalves et al., 2002; Goncalves, 2004; ¹³ Mirzakhani et al., 2020.

水生养殖动物对纤维的消化能力有限。植物纤维可分为两类，一是增加肠道粘性的可溶性纤维，一是增加饱腹感的不可溶性纤维。卡诺拉菜粕可溶性纤维含量是豆粕的一半(Mejicanos et al., 2016)，适量的不溶性纤维可以改善肠道流过时间和饲料摄入量，但也会导致容积膨胀，这对某些物种可能是优势，不同养殖种类对此需要各有不同。降低卡诺拉菜粕纤维含量可以提高其在水产饲料，尤其是营养富集水产饲料的价值。

种类	学名	消化率, %
杂食性海水鱼		
澳洲鲷 ¹	<i>Pagrus auratus</i>	43.9
黑线鳉 ²	<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	60.1
杂食性淡水鱼		
革胡子鲶 ³	<i>Clarias gariepinus</i>	79.9
斑点叉尾鮰 ⁴	<i>Ictalurus punctatus</i>	72.1
南亚野鲮 ⁵	<i>Labeo rohita</i>	49.9
银鲈 ⁶	<i>Bidyanus bidyanus</i>	58.0
尼罗罗非鱼 ⁷	<i>Oreochromis niloticus</i>	76.9

表 9. 杂食性鱼类对卡诺拉菜粕能量的消化率 (未添加消化酶)

¹ Glencross et al., 2004a; ² Tibbitts et al., 2004; ³ Elescho et al., 2021; ⁴ Kitagima and Fracalossi, 2011; ⁵ Hussain et al., 2015; ⁶ Allan et al., 2000; ⁷ Borgeson et al., 2006; Furura et al., 2001;.

种类	学名	消化率, %
肉食性海水鱼		
北极红点鲑 ¹	<i>Salvelinus alpinus</i>	46.8
大西洋鳕 ²	<i>Gadus morhua</i>	60.6
大西洋鲑 ³	<i>Salmo salar</i>	49.0
尖吻鲈 ⁴	<i>Lates calcarifer</i>	47.6
军曹鱼 ⁵	<i>Rachycentron canadum</i>	83.1
欧洲海鲈 ⁶	<i>Dicentrarchus labrax</i>	91.7
大西洋白姑鱼 ⁷	<i>Argyrosomus regius</i>	73.6
虹鳟 ⁸	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	74.1
黄鳍鲷 ⁹	<i>Acanthopagrus latus</i>	56.3
肉食性淡水鱼		
淡水神仙鱼 ¹⁰	<i>Pterophyllum scalare</i>	72.3
头立鱼 ¹¹	<i>Leporinus macrocephalus</i>	79.0
西伯利亚鲟 ¹²	<i>Acipenser baerii</i>	68.1

表 10. 肉食性鱼类对卡诺拉菜粕能量的消化率 (未添加消化酶)

¹ Burr et al., 2011; ² Tibbitts et al., 2006; ³ Burr et al., 2011; ⁴ Ngo et al., 2015; ⁵ Zhou et al., 2005; ⁶ Lanari and D'Agaro, 2005.; ⁷ Glencross et al., 2004a; ⁸ Mwachireya et al., 2000; Burel et al., 2000; Thiessen et al., 2004; Cheng and Hardy, 2002; Lee et al., 2020 ⁹ Wu et al., 2006; ¹⁰ Erdogan and Olmez., 2010; ¹¹ Goncalves et al., 2002; Goncalves 2004; ¹² Mirzakhani et al., 2020.

矿物质与维生素

卡诺拉菜粕是磷的丰富来源，尽管大部分是以植酸磷的形式存在，大多数养殖鱼类也无法利用植酸磷。好在水产饲料中都添加植酸酶(NRC, 2011)，植酸酶将植酸磷分解为水生动物可以利用的非植酸磷。研究表明，植酸酶还可以提高其他矿物质的利用率，包括钙、镁和锰(Cheng and Hardy, 2002; Vandenberg et al., 2011; Hussain et al., 2015)，从而减少这些矿物质在配方的添加量。还有研究表明，柠檬酸和植酸酶一样，有助于释放被植酸结合的矿物质(Habib et al., 2018)。

抗营养因子

与其他植物性饲料一样，卡诺拉菜粕也含有一些可能对水产养殖鱼类有负面影响的成分，在配制日粮时需要考虑这些因素。卡诺拉菜粕含有微量热不稳定的硫代葡萄糖苷和热稳定的植酸、酚类化合物、丹宁、皂苷和纤维，对水生养殖动物可视为抗营养因子。

硫代葡萄糖苷

与猪禽相比，许多鱼类如鲤鱼对硫代葡萄糖苷的耐受性似乎更好(Bischoff, 2019; Prabu et al., 2017)。加拿大卡诺拉菜粕仅有微量硫代葡萄糖苷，大约3.2微摩尔/克，研究报告给出虹鳟对硫代葡萄糖苷的耐受性1.4微摩尔/克(Bischoff, 2019)，允许卡诺拉菜粕在配方中占比超过40%。

植酸

植物性饲料通常以植酸的形式储存磷，植酸在日粮中超过1%会抑制许多水产养殖动物的生长，如鲤(Hossain and Jauncey, 1993)、斑点叉尾鮰(Satoh et al., 1989)、南亚野鲮(Usmanni and Jafri, 2002)和大西洋鲑(Storebakken et al., 1998)，同时降低矿物质的生物学效价，还与蛋白质结合并降低其消化率。

文献	种类	卡诺拉菜粕占比, %	消化率增量 ¹ , %			
			干物质	粗蛋白	总能	磷
Xu et al., 2022	银鲫	18	6	4		19
Habib et al., 2018	南亚野鲮	56				60
Hussain et al., 2017	南亚野鲮	56		28	24	
Iqbal et al., 2021	南亚野鲮	54	25	19	29	
Tayyab et al., 2017	南亚野鲮	56		10	9	31
Maas et al., 2018	尼罗罗非鱼	10	9	0	5	59
von Danwitz et al., 2016	大菱鲆	26	0	2		42
Fries et al., 2020	银鲈	30	4	13	10	29
Sajjadi and Carter, 2004	大西洋鲑	35		0	0	18
Yigit and Keser, 2016	虹鳟	32	0	0		0
Cheng and Hardy, 2002	虹鳟	100 ¹				350

¹回归估计值。

表 11. 植酸酶对卡诺拉菜粕日粮养分消化率的影响

日粮添加植酸酶最初目的是动物能够获取植物性饲料大部分的磷，减少对无机磷来源的依赖，从而减少磷的污染。植酸酶用于水生动物，通常可以提高卡诺拉菜粕日粮干物质、粗蛋白和能量的消化率(表11)，因此也是水产养殖业重要的外源酶。

内源性蛋白酶

植物性蛋白一旦进入某些鱼类日粮，其内源性蛋白酶分泌可能会减少(Santigosa, 2008; Zheng et al., 2020)，通常是由于植物性饲料中蛋白酶抑制剂的存在，尤其是豆粕(Hussain et al., 2021; Francis et al., 2001)。与其他植物性蛋白饲料比较，卡诺拉菜粕很少有蛋白酶抑制剂，如果卡诺拉菜粕与其他含有蛋白酶抑制剂的饲料混合，卡诺拉菜粕蛋白质的消化会受到影响。

在水生动物饲料添加蛋白酶可以补充内源性蛋白酶

分泌抑制的不足。虹鳟饲料配制12%卡诺拉菜粕，并补充蛋白酶，其干物质和蛋白质消化率分别提高了30%和11%(Drew et al., 2005)；一个原料替代饲养试验表明，虹鳟日粮配方添加蛋白酶使干物质、粗蛋白和能量消化率，分别提高了24%、6%和14%(Lee et al., 2020)；对虾日粮配比20%或64%的卡诺拉菜粕，添加蛋白酶改善了日粮的蛋白质效率(Buchanan et al., 1997)。

纤维

鱼类不易消化可溶性和不溶性纤维，纤维通常也不是鱼类日粮的正常组分，可被简单视为养分稀释剂，对某些种类可能是抗营养因子，因而添加多糖酶可能是有益的。虽然对多糖酶有过研究，但有关卡诺拉菜粕的可用数据有限。早期的饲养试验，在罗非鱼日粮配置21%或42%的卡诺拉菜粕，添加纤维素酶并没有任何优势(Yigit and

Olmez, 2010)；罗非鱼日粮配置12%普通菜粕，添加木聚糖酶，罗非鱼的生长性能有所改善(Maas et al., 2020)；黑虎虾日粮配置卡诺拉菜粕，添加复合多糖酶，提高了干物质消化率和生长速度(Buchanan et al., 1997)；鲑鱼也受益于复合多糖酶，其生长率、存活率和饲料效率有所提高(Ali Zamini et al., 2014)。

预榨浸提卡诺拉菜粕 对杂食性或草食性鱼类的价值

卡诺拉菜粕越来越多地用于鲶鱼、鲤鱼、罗非鱼、鲈鱼、鲟鱼和大菱鲆等水产养殖鱼类饲料，低蛋白饲料能满足这些种类的生长发育。虽然仍有许多需要学习，但已经取得重大进展，特别是某些种类。

罗非鱼

罗非鱼是杂食性鱼类，卡诺拉菜粕在罗非鱼饲料可以部分替代鱼粉或豆粕，也可同时替代鱼粉和豆粕。在罗非鱼饲料分别配置0、25、50或75%的卡诺拉菜粕，替代豆粕，处理之间的饵料系数和蛋白质效率没有差异，只有卡诺拉菜粕配比75%时，体增重才有所下降(Soares et al., 2001)。卡诺拉菜粕梯度替代鱼粉的试验，每个梯度增加10%卡诺拉菜粕，最多替代了配方中50%的鱼粉，当替代鱼粉蛋白的比例超过10%时，罗非鱼饲料转化率随卡诺拉菜粕配比线性增加，增重线性下降，但罗非鱼各处理的体成分没有差异；该研究中所有日粮都配比26%的豆粕，卡诺拉菜粕梯度替代鱼粉，菜粕增加而鱼粉减少，导致氨基酸失衡(Yigit and Olmez, 2009)。类似的鱼粉

替代和饲养试验，卡诺拉菜粕在罗非鱼日粮占比55%，替代了配方中75%的鱼粉，其存活率、生长率或饲料效率没有下降，鱼体肌肉组分也没有差异，而该试验日粮中豆粕配比仅为12%(Luo et al., 2012)。

生长率通常用来衡量饲料替代的价值和效率，植物性蛋白替代鱼粉蛋白可以在增益不理想的情况下，显示成本优势。比如罗非鱼日粮1/3的蛋白质来源于卡诺拉菜粕、葵花籽粕或豆粕，该日粮蛋白评分76-78%，鱼粉日粮蛋白评分为97%，蛋白质替代降低了生产成本(Kirimi et al., 2020)。试验结果显示，卡诺拉菜粕替代罗非鱼日粮中的鱼粉和豆粕，占日粮粗蛋白50%时的经济回报最佳(Iqbal et al., 2021b)。



鲤科鱼类

世界各地至少饲养了8种鲤科鱼类(表12)。卡诺拉菜粕氨基酸的组成很特别,人们对其兴趣与日俱增(Kaiser et al., 2022)。

早期的研究表明,卡诺拉菜粕可以很容易地替代三种鲤科鱼类日粮中的鱼粉,但体增重有所减少(表13)。草鱼日粮配置34%的卡诺拉菜粕、20%豆粕和10%棉籽粕,没有鱼粉,其生长最佳,前提是日粮额外添加赖氨酸和蛋氨酸,如果忽略氨基酸平衡,消化酶的分泌就会减少(Jiang

et al. (2016)。也有试验佐证,鲤鱼日粮的鱼粉可以被普通菜粕和小球藻的组合完全替代(Shi et al., 2017),推论卡诺拉菜粕也可以这样做。在南亚野鲮日粮配比卡诺拉菜粕,添加植酸酶或柠檬酸盐,都能提高钙、磷、钠、钾和镁的消化率,从而减少这些矿物质的补充量(Habib et al., 2018)。卡诺拉菜粕作为南亚野鲮的主要蛋白饲料,其生长速度比豆粕、棉籽粕、普通菜粕或鱼粉都高(Iqbal et al., 2015)。

种类	常用名称	起源
<i>Cyprinus caprio</i>	鲤鱼, 欧洲鲤鱼	亚洲和欧洲
<i>Ctenopharyngodon Idella</i>	草鱼	越南, 西伯利亚, 中国
<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	鳊鱼	南亚, 中国
<i>Mylopharyngodon piceus</i>	青鱼	东亚, 中国, 越南
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	鲢鱼	西伯利亚, 中国
<i>Catla catla</i>	卡特拉鱼、卡托鱼、切普蒂鱼、鲍德赫克拉鱼、巴查鱼、卡拉卡特拉鱼、坦布拉鱼	印度, 尼泊尔, 巴基斯坦, 缅甸, 孟加拉国
<i>Cirrhinus mrigala</i>	迈瑞加拉鲮、印度鲮鱼	东南亚, 印度
<i>Labeo rohita</i>	南亚野鲮、罗希塔鱼、罗霍鱼	印度, 尼泊尔, 孟加拉国, 巴基斯坦, 缅甸

表 12. 养殖鲤鱼的主要种类

日粮	种类	存活率, %	始重, g	末重, g	重, g
鱼粉对照	<i>Labeo rohita</i>	100	123.0	356.6	233.6
	<i>Cirrhinus mrigala</i>	100	118.0	332.6	214.6
	<i>Catla catla</i>	100	123.0	362.4	239.4
卡诺拉菜粕替代20%鱼粉	<i>Labeo rohita</i>	100	122.7	420.4	197.7
	<i>Cirrhinus mrigala</i>	100	118.7	305.6	186.9
	<i>Catla catla</i>	100	123.5	337.1	213.6
卡诺拉菜粕替代40%鱼粉	<i>Labeo rohita</i>	100	122.5	284.6	162.1
	<i>Cirrhinus mrigala</i>	100	118.1	282.2	164.1
	<i>Catla catla</i>	100	123.7	305.1	181.4

¹ Abbas et al., 2008.

表 13. 卡诺拉菜粕替代鱼粉对三种鲤鱼生长性能的影响¹

对鲤鱼而言,卡诺拉菜粕替代鱼粉很受青睐(Hussain et al., 2020),通常可在这些鱼类日粮配方占到50-55%,鲤鱼常饲养在污染程度不同的水域,菜粕中多酚类化合物可使其收益,如果甘蓝多酚维持在200-500毫克/公斤,采食量、消化率和生长速度有所改善。甘蓝型油菜含有芥子碱、芥子酸和芥花醇等多酚类物质(Nandasiri et al., 2019),这些物质具有抗氧化和抗菌特性。因此,卡诺拉菜粕在次优养殖条件下,可能具有特别优势。

鲶鱼

鲶鱼很容易饲养于渠道或池塘，广泛养殖的鲶鱼起源于三个属(表 14)。

属/科	常用名称	起源
鮠鲶属	条纹鲶鱼、巴萨鲶鱼、斑点叉尾鮠、鲟鱼	南亚
鮠科	斑点叉尾鮠	北美
鲶鱼科	北非鲶鱼、呼气鲶鱼	北非、南亚

表 14. 主要养殖鲶鱼种属

正因为鲶鱼容易饲养，有关日粮特性和生长参数的研究寥寥无几。早期饲养试验用卡诺拉菜粕替代斑点叉尾鮠日粮中的玉米和豆粕(表 15)，部分替代豆粕如日粮 3、4 和 5，卡诺拉菜粕在日粮配比 36%，与豆粕日粮 2 比较，改善了生产性能，但各试验日粮都比鱼粉日粮 1 的效果差 (Webster et al., 1997)。

饲料	日粮					
	1	2	3	4	5	6
鱼粉, %	8	4	4	4	4	4
豆粕, %	51	57	47	37	27	17
卡诺拉菜粕, %	0	0	12	24	36	48
性能参数						
增重, %	743	379	599	542	608	442
蛋白质效率	1.96	1.36	1.78	1.73	1.68	1.45
存活率, %	100	98	100	100	100	100

¹Abbas et al., 2008.

表 15. 卡诺拉菜粕与豆粕混合对斑点叉尾鮠生长性能的影响¹

普通菜粕替代亚洲红尾鲶饲料中的鱼粉，配合比例分别为 0、12、24、36 或 48%，普通菜粕配比 36% 以下，末重和增重与对照组没有显著差异；观察所有处理，随菜粕配比增加，增重呈下降趋势，但存活率无差异；消化酶如胃蛋白酶、胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶活性随菜粕配比增加而下降 (Zhang et al., 2020)。

预榨浸提卡诺拉菜粕对肉食性鱼类的价值

肉食性鱼类饲料 50% 的鱼粉可以被其他蛋白质替代 (Oliva-Teles et al., 2015)，但植物源性蛋白质替代 50% 以上的鱼粉蛋白会带来麻烦，因为肉食性鱼类的消化道适合消化动物蛋白，且对蛋白质和氨基酸的需求很高 (Araujo et al., 2021)，如果没有浓缩蛋白就很难满足需要，其中一些浓缩蛋白可能无法很好地平衡所有必需氨基酸。卡诺拉菜粕蛋白质的氨基酸组成比其他任何植物蛋白都接近鱼粉，因而是替代鱼粉的最佳来源 (Enami, 2011; Kaiser et al., 2022)。这种情况下，卡诺拉菜粕适合替代其日粮中的部分鱼粉，该比例可能比杂食性鱼饲料中的占比要少些。

鳟鱼

卡诺拉菜粕或普通菜粕的氨基酸组成已被证明是虹鳟日粮鱼粉的理想替代品(Slawski et al., 2013), 90.9%的蛋白质消化率与鱼粉89.2%的消化率非常接近(Burel et al., 2000)。

在消化率测定以外, 一些饲养试验结果令人鼓舞。卡诺拉菜粕再加蛋氨酸, 可以替代鳟鱼饲料中的鱼粉, 菜粕在配方占比由5%增加到30%, 鱼粉蛋白由57%减到10%, 为期16周的饲养试验, 未观察到菜粕替代的负面效应。研究人员确定, 卡诺拉菜粕有潜力取代鳟鱼饲料中大量的鱼粉(Shafaeipour et al., 2008)。

虹鳟鱼苗初始重1.5克, 为其配制等氮日粮, 分别配比0、8、16、24或32%的卡诺拉菜粕, 替代日粮中的鱼粉和玉米面, 饲养12周, 观察到日粮卡诺拉菜粕比例渐次增加, 生长率略有下降, 但在可接受的范围, 卡诺拉菜粕对采食量并没有不利影响, 8%或16%卡诺拉菜粕日粮的生产性能与对照组没有显著差异(Yigit et al. (2012), 尽管增重和特殊生长率的数值较低, 却没有统计意义上的差异(表16)。

生产性能	卡诺拉菜粕配比, %				
	0	8	16	24	32
始重, g	1.55	1.57	1.56	1.57	1.58
末重, g	14.21	13.06	12.82	11.79	10.48
增重, g	12.65	11.51	11.24	10.20	8.88
特定生长率, %/天	2.45	2.36	2.30	2.24	2.10
采食量, g	12.80	12.77	12.55	12.35	11.49
饵料系数	1.04	1.10	1.09	1.19	1.30
存活率, %	98.3	98.3	98.3	98.3	96.6

¹ Yigit et al., 2012.

表 16. 虹鳟鱼苗日粮配比卡诺拉菜粕对生长性能的影响¹

类似的试验给虹鳟配制日粮, 卡诺拉菜粕分别占比0、7.5、15、22.5和30%, 也观察到卡诺拉菜粕配比增加而特定生长率呈线性下降(Collins et al., 2012)。这与前面的试验结果类似, 说明卡诺拉菜粕在虹鳟日粮中的配比应限制在15%。

在虹鳟鱼苗日粮中配比15%卡诺拉菜粕, 菜粕分别来自褐色油菜籽和黄色油菜籽, 鱼苗始重都为2.5克, 黄色菜粕的末重与对照组相当, 褐色菜粕的末重轻于黄色菜粕, 但特定生长率或饲料效率没有显著差异(Anderson et al., 2018)。

虹鳟日粮配比32%的卡诺拉菜粕, 同时补充纤维素酶、植酸酶和果胶酶, 似乎未能提高生长性能(Yigit and Keser, 2016), 需要进一步研究卡诺拉菜粕与酶的应用。

以上结果表明, 卡诺拉菜粕在虹鳟日粮配合比例可达15%, 同时减少鱼粉的用量, 补充酶可以增加卡诺拉菜粕的配合比例, 虽然不能完全替代配方中的鱼粉, 但有助于养殖业的可持续发展。

鲑鱼

鲑鱼比鳟鱼对植物碳水化合物的耐受性低, 许多研究都以豆粕或大豆浓缩蛋白做植物蛋白来源, 也有一些研究评估卡诺拉菜粕饲养鲑鱼的效果。

卡诺拉菜粕抗原物质比豆粕少, 不可能引起过敏, 对鲑鱼而言是优于豆粕的蛋白质(Drew, 2004)。豆粕或大豆浓缩蛋白会引起肠道过敏反应, 作为鲑鱼饲料蛋白质会有问题(Kaiser et al., 2022)。另外, 卡诺拉菜粕蛋白质比豆粕的生物学价值更高(Enami, 2011)。

鉴于卡诺拉菜粕纤维成分, 建议鲑鱼日粮配比10%较为安全(Burr et al, 2013; Collins et al, 2013), 但也有迹象表明可以配比更多。澳大利亚有一项试验, 评估配比35%卡诺拉菜粕对鲑鱼的饲养效果, 存活率达到100%, 日粮消化率超过90%(Sajjadi and Carter, 2004)。

预榨浸提卡诺拉菜粕 对甲壳类水生动物的价值

凡纳滨对虾

卡诺拉菜粕在世界各地已被成功地用于虾和对虾日粮。早期在中国的试验发现，虾日粮配比15%的卡诺拉菜粕，其生长性能与对照组无显著差异，但配比30%或45%导致采食量下降，生长速度降低(Lim et al., 1997)。此后，人们不断获得有关这些物种营养需要的知识。

墨西哥的试验表明，南美蓝对虾幼虾苗日粮配比30%的卡诺拉菜粕，替代日粮中的鱼粉、豆粕和小麦，并未影响蓝幼虾的生长性能(Cruz-Suarez et al., 2001)。在马来西亚，研究人员用卡诺拉菜粕替代虾日粮中20%的鱼粉，生长性能正常(Bulbul et al., 2014)；同一研究小组将卡诺拉菜粕与豆粕按4:6混合，配以诱食剂可全部替代日本囊对虾日粮中的鱼粉(Bulbul et al., 2016)。

给虾供给鱼粉日粮作为对照，处理组蛋白来源为50:50卡诺拉菜粕与豆粕混合饲料，或来源于发酵的50:50菜粕-豆粕混合饲料，虾对鱼粉对照组的消化率为94.7%，对发酵混合蛋白饲料的消化率为93.0%，未发酵混合蛋白饲料的消化率为83.7%，未发酵混合蛋白饲料的增重为1.1克/周，发酵混合蛋白饲料的增重为1.0克/周，鱼粉对照日粮的增重为0.9克/周，发酵混合蛋白饲料的存活率最高(Escobar et al. (2022))。

Glencross 等(2018)发表了黑虎虾对29种饲料的消化率(表17)，卡诺拉菜粕消化率位列其中，还列出了3种鱼粉的消化率作为参照。

消化率, %	卡诺拉菜粕	鳊鱼	鲮鱼	金枪鱼
干物质	34.5	58.7	48.6	35.5
粗蛋白	75.0	83.7	81.5	73.5
脂肪	71.6	67.3	100	95.2
能量	26.5	65.1	53.0	52.1

表 17. 虾对卡诺拉菜粕及 3 种鱼粉的消化率, %

淡水虾

与海水虾类似，只要饲料适口性好，淡水虾可以依赖植物性蛋白正常生长发育。澳大利亚的研究人员给淡水虾日粮配比0、20或64%的卡诺拉菜粕，如果卡诺拉菜粕的配比较高，需要复合酶提高饲料消化率，才能达到对照组无菜粕日粮的生长率(Buchanan et al., 1997)。若在淡水虾日粮只配合18%的卡诺拉菜粕，生长率和存活率与参考日粮的基本持平(Suarez et al. (2009))。

以鱼粉为对照日粮，给淡水虾提供4种测试饲料，卡诺拉菜粕分别替代25、50、75或100%的鱼粉蛋白，替代25%或50%鱼粉蛋白的生长率优于对照日粮，替代75%或100%鱼粉蛋白的生长率与对照组相当(Biabani et al., 2016)。研究人员认为，卡诺拉菜粕可以替代淡水虾日粮中50%的鱼粉蛋白，且安全有效。

其他甲壳类水生动物

青蟹似乎能轻松地消化卡诺拉菜粕，干物质和粗蛋白的消化率分别达到83.5%和87.6%(Thuong et al., 2008)，堪与鱼粉比肩，青蟹对鱼粉干物质和粗蛋白的消化率分别为85.4%和87.6%。若卡诺拉菜粕和豆粕按50:50混合，中华绒螯蟹日粮中40%的鱼粉可被菜粕-豆

粕混合蛋白取代，且生长发育不受影响。果胶是卡诺拉菜粕或普通菜粕的抗营养因子，添加果胶酶可能会提高卡诺拉菜粕在中华绒螯蟹饲料中的效用(Ren et al., 2018)。

窄爪小龙虾饲料调查结果显示，磨碎的卡诺拉油菜籽是很有前景的小龙虾饲料(Safari et al. (2014)。

卡诺拉浓缩蛋白

卡诺拉菜粕经水提取蛋白质生产卡诺拉浓缩蛋白(Burr et al., 2013; Thiessen et al., 2004)，并去除了其中的抗营养因子(主要是纤维)，得到比卡诺拉菜粕蛋白更高的产品，更容易用于蛋白质需求量很高的饲料配方。卡诺拉浓缩蛋白的粗蛋白含量与鱼粉大致相当，其氨基酸组分比玉米蛋白粉或大豆浓缩蛋白更好，卡诺拉浓缩蛋白完全替代鱼粉的可能性因水生动物种类而异，也与迄今为止所有研究中日粮的感官特征有关。

与对照组日粮比较，虹鳟日粮中的卡诺拉浓缩蛋白对其生长没有负面影响(Collins et al., 2012)。类似的试验确认卡诺拉浓缩蛋白可以全部替代虹鳟日粮中的鱼粉(Slawski et al., 2012)，后续试验中用卡诺拉浓缩蛋白、卡诺拉菜粕替代0、25、50、75和100%的鱼粉，数据显示替代75%鱼粉的增重效果优于鱼粉日粮(Slawski et al., 2013)。鲑鱼日粮若配比较多植物性蛋白，卡诺拉浓缩蛋白替代鱼粉，占比10%最为适宜，占比超过20%导致生长速度下降(Burr et al., 2013)。卡诺拉浓缩蛋白用于某些鱼类饲料，可能需要添加诱食剂。

芥花油对水生动物的价值

随商业养殖鱼类和甲壳类动物的需求增加，鱼油越来越短缺，预计未来供应紧张的情况还会加剧。用植物油替代鱼油的研究已有不少，这种替代对鱼类生长性能几乎没有负面影响(Glencross and Turchini, 2011)。芥花油独特之处在于其单不饱和脂肪酸(油酸)的占比高。

据调查，芥花油和菜籽油因其亚油酸(Omega-6)含量低，有助于维持鱼体Omega-3与Omega-6的天然比例，成为鲑鱼和鳟鱼饲料应用最广泛的植物油(Turchini et al., 2013)。植物油中饱和及单不饱和脂肪酸优先被氧化以供给能量，同时也保护了长链多不饱和脂肪酸免遭氧化(Salini et al., 2015)。用芥花油替代虹鳟日粮中90%的鱼油，生产性能得以维持，鱼片中Omega-3与Omega-6的比例有些微变化(Turchini et al., 2013)。也有类似研究，虹鳟日粮的油脂100%来源于芥花油，未观察到生产性能差异(Karayucel, and Dernekbaşı, 2010)。

水生动物生长期日粮用植物油，生长后期则用鱼油，这样可以在生长期节省成本，育肥期利于沉积脂肪组织。在鲷鱼生长阶段，日粮富含芥花油，育肥期改用鱼油，这样鲷鱼能在组织长成理想的脂肪酸比例；若在生长阶段饲喂豆油，鱼体则会沉积大量的亚油酸，即使在育肥期改用鱼油，也无法吸收大量沉积的亚油酸(Izquierdo, et al., 2005)。



扫码查阅
完整参考文献



加拿大油菜籽协会

地址: 400-167 Lombard Avenue Winnipeg, Manitoba Canada R3B 0T6

电话: 01-(204) 982-2100

邮件: admin@canolacouncil.org

网站: www.canolacouncil.org