

## 脂肪消化酶特征及其天然活性抑制剂研究进展

章明春<sup>1</sup>, 杜舒梦<sup>1</sup>, 刘元法<sup>2</sup>, 叶展<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> 江南大学食品学院 江苏无锡 214122

<sup>2</sup> 食品科学与资源挖掘全国重点实验室 江苏无锡 214122)

**摘要** 脂肪消化酶是一类能够水解酯键酶类的统称,其主要参与脂肪消化、代谢、运输等生理过程,在维持生物体正常生命活动方面发挥着重要作用。舌脂肪酶、胃脂肪酶、胰脂肪酶等是人体水解膳食脂肪的主要脂肪酶,它们通过与乳脂肪液滴特异性结合,水解酯键最终得到游离脂肪酸和甘油,进而被机体吸收利用。通过调控脂肪酶的水解活性,还可实现对膳食脂肪水解过程的调控。本文概述膳食脂肪胃肠道消化过程,总结舌脂肪酶、胃脂肪酶、胰脂肪酶和磷脂酶四大类脂肪消化酶的结构特征以及其对脂肪的水解特性。综述近年来有关脂肪酶天然活性抑制剂的研究进展。本文旨在促进人们对膳食脂肪胃肠道消化过程以及对脂肪消化酶结构和功能特性的了解,为开发脂肪消化酶活性调控天然产物,调节膳食脂肪水解行为,实现相关慢性代谢疾病的预防提供一定的理论参考。

**关键词** 脂肪消化酶; 膳食脂肪; 结构功能; 水解特性; 活性抑制剂

**文章编号** 1009-7848(2026)01-0410-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2026.01.036

膳食油脂是人体所需的三大营养素之一,一般情况下,人们将在常温下呈液态的称为“油”,呈固态的称为“脂”。膳食油脂的来源、组成特征和结构特性,如图 1 所示。

食用油脂来源广泛,按照生物来源可分为动物油料油脂、植物油料油脂和微生物油料油脂。动物油料油脂一般来源于动物脂肪组织,如猪油、鱼油、鲸油等;植物油料油脂,主要来源于植物的种子、根茎等,如橄榄油、棕榈油、菜籽油等;微生物油脂主要来源于产脂微生物,包括酵母、霉菌、细菌和藻类等<sup>[2-4]</sup>。在化学组成上,油脂是多种物质组成的混合物,其主要成分是由 3 分子高级脂肪酸和 1 分子甘油脱水形成的甘油三酯(Triacylglycerols, TAGs)。根据脂肪酸类别和 TAG 结构的差异,不同油脂的物理、化学性质和营养功能特性存在一定差异。总体而言,摄入的食用油发挥如下主要功能:为机体提供必需脂肪酸和脂溶性微量营养素,参与组成机体结构和供给机体能量,作为维持生命代谢信号转导、激素合成等因子的前体等,

因此,膳食油脂对于维持人体正常的生命活动发挥着重要作用<sup>[5-6]</sup>。

TAGs 是膳食脂肪的主要成分,在精炼油脂中的 TAGs 含量甚至可超过 95%。膳食脂肪在人体内胃肠道的消化是一个涉及多种物理化学、生理学等反应和调控的复杂过程,以其中最主要的 TAGs 为例,经由口腔摄入到达胃中,TAGs 首先被口腔黏液腺分泌的舌脂肪酶和胃主细胞分泌的胃脂肪酶部分消化,随后到达小肠,在小肠内腔完成主要水解过程。在小肠中,TAGs 在脂肪酶和各类盐离子的共同作用下,最终水解为游离脂肪酸(Free fatty acids, FFAs)、单甘酯(Monoglycerides, MAGs)与甘油。脂肪酶在膳食脂肪消化过程中发挥着关键作用,其特异性酶水解作用断裂 TAGs、甘油磷脂和胆固醇酯等脂质分子内部的酯键。人体内的脂肪酶主要包括舌脂肪酶、胃脂肪酶、胰脂肪酶、磷脂酶、胆固醇酯酶等,它们共同参与并完成膳食脂肪消化的全过程,在维持生物体正常的代谢活动中发挥重要作用。基于明晰膳食脂肪消化酶的功能特性和结构特征,通过靶向膳食脂肪消化酶,调控膳食脂质的水解、吸收和后续代谢等过程,进而实现肥胖、非酒精性脂肪肝、血脂异常等慢性代谢疾病调控,在近年来受到越来越多的关注,相关理论在医学干预、功能性食品制造等领域得到应用。

**收稿日期:** 2025-02-04

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32201936,32572483);  
江苏省自然科学基金青年科学基金项目(BK20221076)

**第一作者:** 章明春,女,硕士生

**通信作者:** 叶展 E-mail: yezhan@jiangnan.edu.cn

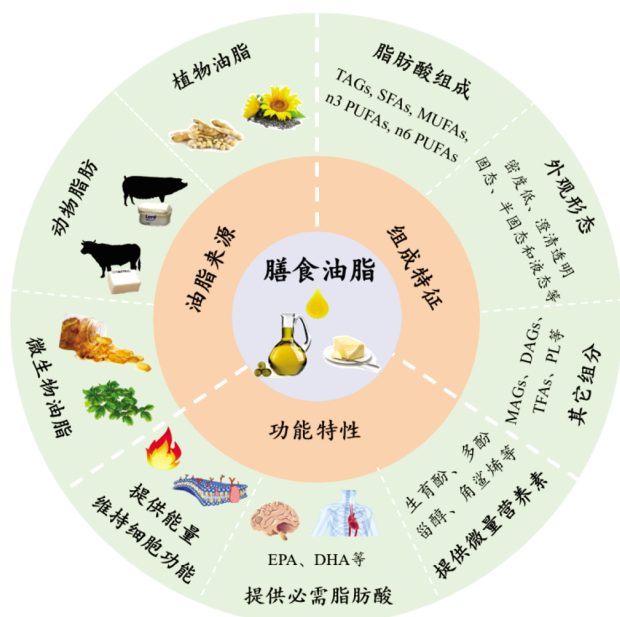


图 1 膳食油脂的来源、组成特征和功能特性<sup>[1]</sup>

Fig.1 The sources, composition characteristics, and functional properties of dietary oils and fats<sup>[1]</sup>

基于此,本综述首先概述膳食脂肪在生物体内消化的过程,继而解析人体内几类主要脂肪消化酶的结构特征以及功能特性,最后,总结近年来脂肪消化酶天然活性抑制剂的相关研究进展。以期明晰膳食脂肪消化酶的结构和水解功能特性,通过靶向脂肪消化酶,实现相关慢病的调控。

## 1 膳食脂肪的胃肠道消化过程

膳食油脂的胃肠道消化过程示意图,如图 2 所示。膳食脂肪的胃肠道消化过程主要分为 2 个阶段,即前十二指肠消化和小肠消化。两种消化过程分别为膳食脂肪在口腔、胃中的消化,以及在小肠中的消化,后者也是绝大多数膳食脂肪主要的消化方式。在口腔中,食物通过咀嚼形成食物丸,这一过程将大体积的食物物理破碎为细小颗粒,增加了消化的表面积,为后续油脂在胃肠道中的消化水解做准备<sup>[7]</sup>。当食物丸进入胃部后,舌脂肪酶和胃脂肪酶特异性水解部分 TAG 的 Sn-3 位酯键,释放甘油二酯(Diacylglycerols, DAGs)和 FFAs。经过上述预消化后,膳食脂肪以乳滴的形式进入十二指肠,被胰脂肪酶水解为 Sn-2 MAGs,分子重排后最终降解得到甘油和 FFAs<sup>[8]</sup>。

前十二指肠消化主要涉及了舌脂肪酶和胃脂肪酶,这两种脂肪酶都优先水解 Sn-3 位酯键,形成 Sn-1,2-DAG 和 FFAs,且其水解 Sn-3 酯键的活性是 Sn-1 酯键的 2 倍<sup>[9]</sup>。然而舌脂肪酶与胃脂肪酶在前十二指肠消化中哪种占据主要地位因物种而异:在大鼠和小鼠中,舌脂肪酶发挥主要作用;而在兔子、狒狒和人类中,胃脂肪酶占据主导地位<sup>[10]</sup>。TAGs 在啮齿类动物口腔中的分解主要由舌脂肪酶介导,而在灵长类动物中,舌脂肪酶对脂肪消化和吸收的贡献被认为相对有限<sup>[11]</sup>。然而,似乎存在一定比例的人群在口腔中也进行具有底物特异性的脂肪分解,而目前尚未在健康成人中得到明确的证据<sup>[12]</sup>。特别是,舌脂肪酶对婴儿和胰腺功能不全疾病患者具有重要意义。对婴儿而言,他们的胰脂肪酶活性较低,所以依赖舌脂肪酶穿透乳脂球并开始脂质消化;对于胰腺疾病患者而言,舌脂肪酶则有助于其体内胃脂肪酶介导脂质的消化<sup>[13]</sup>。

膳食脂肪的消化是一种界面过程,它依赖于脂肪酶和乳化脂肪滴界面的吸附。因此,虽然在前十二指肠消化过程中,发生的水解程度只占膳食脂肪的 10%~30%,但该过程增加了 TAGs 的溶解性和共脂肪酶结合脂肪乳滴的能力,同时完成了膳食脂肪的乳化过程,对 TAGs 的水解具有重要意义<sup>[9]</sup>。在口腔中,咀嚼过程促进了唾液酶和食物的混合,也将食物原料进行剪切,完成了膳食脂肪的初步乳化。当食物进入胃部后,胃部的肌肉收缩产生胃窦收缩波,进一步分解食物颗粒,有时会形成乳液乳膏层。最后,通过幽门中的高剪切力对脂肪液滴均质化,扩大可用于脂肪酶吸附的表面积来促进有效的胰脂肪酶酶解<sup>[14]</sup>。

当油脂乳滴进入小肠后,胰脂肪酶水解 TAGs 的 Sn-1 和 Sn-3 位酯键,生成 FFAs 和 Sn-2 MAGs,Sn-2 位的脂肪酸在消化过程中发生分子重排,最后被降解为甘油和 FFAs。该水解过程涉及了胰脂肪酶、共脂肪酶和胆盐之间的复杂相互作用。在肠腔中,共脂肪酶与胰脂肪酶的 C 端结构域结合形成复合物,将胰脂肪酶锚定在胆盐覆盖的膳食脂肪表面,同时稳定其活性构象,使“盖子”结构域维持打开状态,为膳食脂肪的水解创造稳定的环境<sup>[14-15]</sup>。而胆盐是存在于生物胃肠道中的表

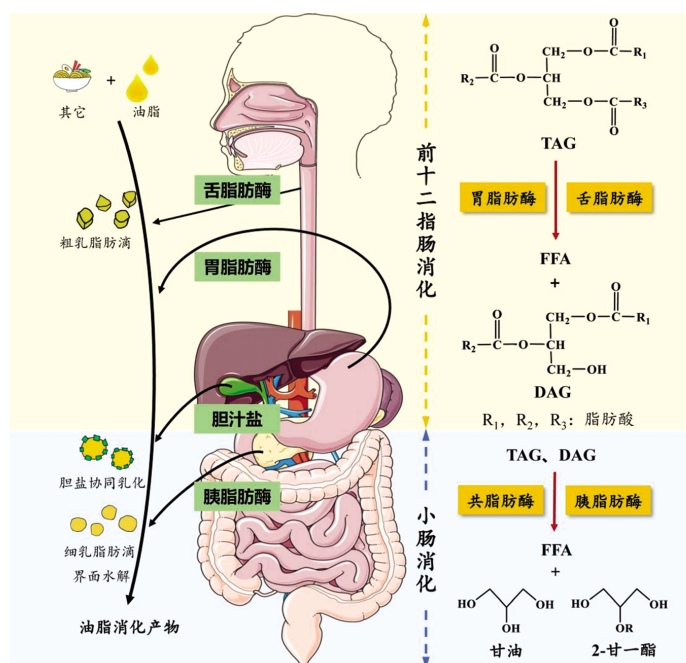


图2 人体消化道结构和膳食油脂的胃肠道消化过程<sup>[5]</sup>

Fig.2 The structure of the human gastrointestinal digestion tract and the gastrointestinal digestion process of dietary oils and fats<sup>[5]</sup>

面活性剂,它通过胆管分泌进入肠道。与经典表面活性剂不同,胆盐表现出表面极性,在扁平的甾体结构中,极性羟基在凹面,甲基在凸面。它能够推开脂质初始吸附的物质,并允许胰脂肪酶-共脂肪酶复合物作用于胆盐覆盖的脂肪液滴,协助胰脂肪酶对 TAGs 的消化。此外,胆盐还有助于消化产物形成胶束,从而被小肠上皮细胞吸收,同时也有助于将脂肪消化产物剥离于乳脂肪滴界面,加速 TAGs 的消化和吸收<sup>[16-17]</sup>。

## 2 胃肠道脂肪消化酶的结构特征

脂肪酶是一组酶,能够水解连接脂肪酸和甘油骨架的酯键,在消化膳食 TAGs 中发挥重要作用,并得到消化产物 DAGs、MAGs、FFAs 和甘油。许多脂肪酶的活性位点存在于 N 端结构域中,由表面环、 $\beta 5$  环和  $\beta 9$  环组成“盖子”控制。这个“盖子”让脂肪酶在水/油界面有特殊的催化和界面活性,对于底物进入活性位点和调节催化机制至关重要,其结构和作用因物种而异<sup>[18]</sup>。

### 2.1 舌脂肪酶

舌脂肪酶和胃脂肪酶拥有相同的氨基酸序

列,且都优先水解 TAG 的 Sn-3 位酯键,然而来源于不同物种的两种脂肪酶活性存在较大差异,如在小鼠和大鼠中,舌脂肪酶具有很强的脂肪分解活性,而对于家兔和豚鼠,胃脂肪酶的活性较高。舌脂肪酶最初在大鼠中发现,由舌头下方的冯氏腺所分泌,其分泌水平受到昼夜、咀嚼等因素的影响<sup>[13,19]</sup>。随后,人们在羔羊、小牛、狒狒、海豚等动物中也发现了舌脂肪酶的存在<sup>[20-21]</sup>,而在人类等哺乳动物中,舌脂肪酶被认为可充当消化 TAGs 的辅助酶。早在 1985 年,研究者即成功纯化出了大鼠的舌脂肪酶,其发现该酶由 395 个氨基酸残基组成,分子质量约为 5.2 ku,且拥有一个包含丝氨酸残基的短区域,这与猪胰脂肪酶的 Ser152 的位置相似<sup>[22]</sup>。

### 2.2 胃脂肪酶

人胃脂肪酶是由胃底的主要细胞分泌的耐酸性酶,含有 379 个氨基酸残基,属于  $\alpha/\beta$  水解酶折叠家族。其核心结构域位于残基 9~183 和 309~379 之间,包含 1 个由 8 条链组成的  $\beta$  折叠,其中 7 条是平行的,1 条是反平行的。它具有 1 个经典的催化三元组 (Ser-153、His-353、Asp-324) 和 1

个氧阴离子空穴 (Gln-154 和 Leu-67 的 NH 基团), 在电子密度图上鉴定存在 4 个 *N*-糖基化位点。催化丝氨酸深埋在由 30 个残基组成的片段下, 该片段即可以定义为“盖子”<sup>[23-24]</sup>。其结构如图 3 所示。

### 2.3 胰脂肪酶

由胰腺分泌的脂肪酶主要是胰脂肪酶(Pancreatic triglyceride lipase, PTL)及其家族成员: 胰脂肪酶相关蛋白 1 和 2 (Pancreatic lipase-related protein 1/2, PLRP1/2)。两者与 PTL 分别有 68% 和 65% 的氨基酸同源性, 它们的结构成分中的催化三元组 Ser-His-Asp 是高度保守的。3 种酶的结构, 如图 4 所示。

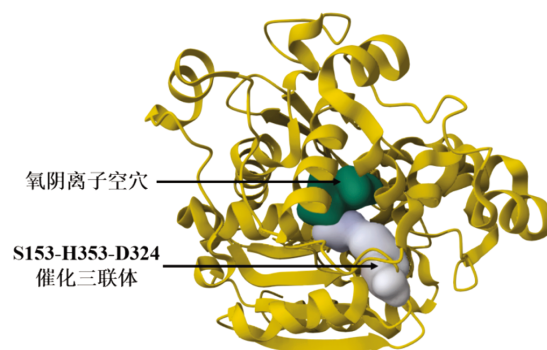


图 3 人胃脂肪酶三维空间结构(3.00 Å)  
Fig.3 The three dimensional spatial structure of human gastric lipase (3.00 Å)

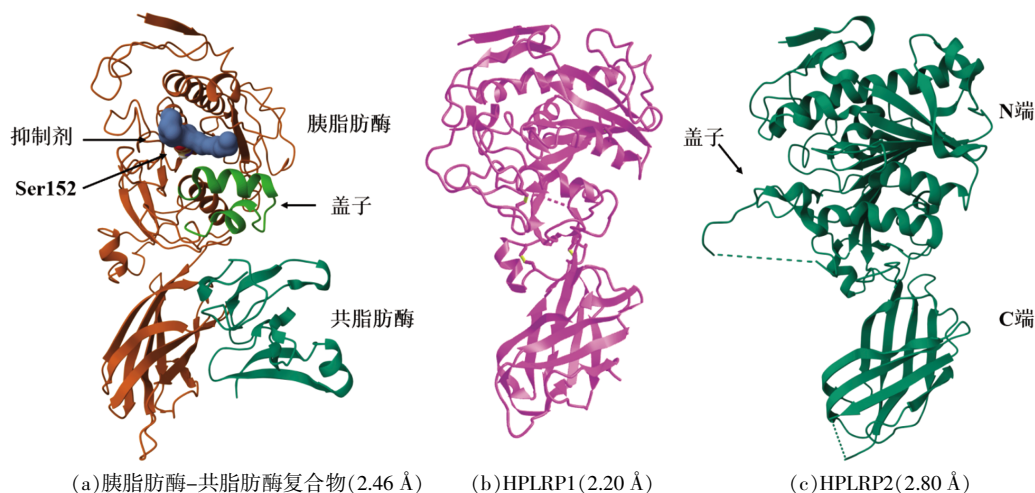


图 4 人胰脂肪酶和其家族成员的三维空间结构

Fig.4 The three dimensional spatial structure of human pancreatic lipase and its family members

人类胰脂肪酶 (Human pancreatic lipase, HPL) 是由 449 个氨基酸组成的单链糖蛋白, 分为 2 个折叠单元。较大的 N 端结构域包括 1~335 残基, 是典型的由中央平行的  $\beta$  折叠主导的  $\alpha/\beta$  结构; C 端结构域属于  $\beta$ -三明治型, 由两层  $\beta$  折叠构成, 每层  $\beta$  折叠由 4 条反平行链组成。N 端结构域中存在活性位点, C 端结构域提供了共脂肪酶的主要结合表面。色氨酸残基 152 是 HPL 催化过程中必不可少的亲核残基, 是 Asp-His-Ser 三联体的一部分, 这个位点被表面的“环”结构覆盖, 溶剂无法进入, 此即所谓的“盖子”结构。在 HPL 分子结构中, 半胱氨酸残基 238 和 262 之间的二硫键

形成的区域是最大的“环”结构; 另外由 76~80 氨基酸残基构成的“环”结构, 以及由 213~217 氨基酸残基形成的  $\beta 5$ “环”结构也在空间上盖住了催化部位, 因此, 底物在与假定的结合位点结合前必须发生实质性的构象变化<sup>[25-26]</sup>。

每个 PLRP 都有 1 个 17 个氨基酸的信号肽, 结构与 PTL 具有显著相似性。PLRP1 在大鼠中有 456 个残基, 在人类中有 451 个残基; 胰脂肪酶相关蛋白 2 (PLRP2) 含有 452 个氨基酸, 比 PTL 略长。PLRP1 没有脂肪酶活性, 在此不进行深入分析。PLRP2 在结构上与 PTL 相类似, 含有 N 端结构域(氨基酸残基 354~466)和 C 端结构域(氨基

酸残基 18~353)。N 端结构域是  $\alpha/\beta$  折叠结构, C 端结构域具有  $\beta$ -三明治结构。而不同物种间 PLRP2s 的“盖子”结构不尽相同, 豚鼠 PLRP2 是目前唯一一个在“盖子”结构域有缺失的 PLRP2 亚家族成员, 被 5 个残基组成的短环取代; 人体 PLRP2 的“盖子”在溶液中呈开放结构, 而大鼠 PLRP2 的“盖子”则呈封闭构象。这种“盖子”结构的差异导致了 PLRP2s 在结构-功能关系上的混淆, 可能由 HPL 中参与稳定“盖子”构象的氨基酸残基的差异所解释, 这些残基中的大多数在 PLRP2s 中发生了突变。例如, 打开的 HPL“盖子”通过盐桥(D257-K26)和氢键(R256-Y267)与蛋白质的核心相互作用, 而这 4 个残基在人 PLRP2 中被 G、G、F 和 E 取代, 不再可能相互作用<sup>[18,27]</sup>。

## 2.4 磷脂酶

磷脂酶(Phospholipase, PL)是在生物体内存在的可水解甘油磷脂的一类酶, 根据催化位点的不同主要分为磷脂酶 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、B、C 和 D。PLA<sub>1</sub> 调节磷脂 Sn-1 位脂肪酸的水解, PLA<sub>2</sub> 则催化 Sn-2 位酯键的水解。不同磷脂酶作用于磷脂分子的作用位点, 如图 5 所示。

PLA<sub>1</sub> 由 2 个结构不同的家族组成: 胞外 PLA<sub>1</sub> 和胞内 PLA<sub>1</sub>。其中, 胞外 PLA<sub>1</sub> 包含 6 种酶, 分别是肝脂肪酶 (HL)、PLRP<sub>2</sub>、磷脂酰丝氨酸特异性 PLA<sub>1</sub> (PS-PLA<sub>1</sub>)、膜相关磷脂酸选择性 PLA<sub>1 $\alpha$</sub> 、PLA<sub>1 $\beta$</sub>  (mPA-PLA<sub>1 $\alpha/\beta$ ) 和内皮脂肪酶 (EL)。它们都属于脂肪酶基因家族, 由 465~500 个氨基酸组成, 包括 3 个氨基酸残基组成的催化三联体, 1 个  $\beta$ 5 环, 1 个  $\beta$ 9 环和 1 个“盖子”结构域。其中, HL、LPL、PLRP<sub>2</sub> 具有较长的  $\beta$ 9 环和较长的“盖子”结构域, 而 PS-PLA<sub>1</sub>、mPA-PLA<sub>1 $\alpha/\beta$  具有较短的  $\beta$ 9 环和较短的“盖子”结构域, EL 具有较长的  $\beta$ 9 环和较短的“盖子”结构域。胞内 PLA<sub>1</sub> 由 711~1 000 个氨基酸组成, 具有催化活性的丝氨酸残基、SAM 结构域和 DDHD 结构域, 通常参与膜运输和细胞器维持<sup>[29]</sup>。</sub></sub>

哺乳动物中有 30 多种 PLA<sub>2</sub> 酶, 可分为细胞外和细胞内两类, 前者包括低分子量分泌 PLA<sub>2</sub> (sPLA<sub>2</sub>), 后者包括 Ca<sup>2+</sup> 依赖性细胞质 PLA<sub>2</sub> (cPLA<sub>2</sub>) 和 Ca<sup>2+</sup> 非依赖性 PLA<sub>2</sub> (iPLA<sub>2</sub>) 等。这些酶催化甘油磷脂水解生成 (不饱和) 脂肪酸和溶血磷

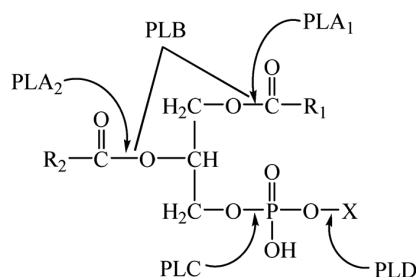


图 5 不同磷脂酶作用于磷脂分子的作用位点<sup>[28]</sup>  
Fig.5 The action sites of different phospholipases on phospholipid molecules<sup>[28]</sup>

脂。sPLA<sub>2</sub> 家族的蛋白分子质量为 14~19 ku, 具有高度保守的 Ca<sup>2+</sup> 结合环和有 His-Asp 二联体的催化位点, 此外, 还存在 6 个绝对保守的二硫键和 2 个独特的二硫键, 以保持酶的高度稳定性; cPLA<sub>2</sub> 家族的酶通常具有 1 个 N 端 C2 结构域, 该结构域与 2 个 Ca<sup>2+</sup> 离子结合, 随后是 1 个具有脂肪酶共识基序 GX SXG/A 的催化结构域。人类基因组表达 9 种 iPLA<sub>2</sub> 酶, 具有不同于 PTL 的折叠拓扑结构, 具有催化二联体 (Ser-Asp), 然而不含有“盖子”结构域。在 iPLA<sub>2</sub> 酶中, 具有 N 端结构域的酶主要作用于磷脂, 反之则作用于中性脂质<sup>[30]</sup>。

## 3 胃肠道脂肪消化酶的脂肪水解特性

当食物进入消化道后, 少部分的 TAGs 在口腔和胃中发生水解, 它们被舌脂肪酶和胃脂肪酶水解 Sn-3 位酯键, 生成 Sn-1, 2-DAGs 和 FFAs, 随后经过初步消化的脂肪成分与其它未被水解的膳食脂肪随后进入小肠。在正常的成年人体内, 小肠的长度一般可达 5~6 m, 是食物滞留时间最长的消化道部分。在小肠中, DAGs 与 TAGs 被胰脂肪酶水解为 MAGs 和 FFAs, 经过分子重排后, 被最终水解为 FFAs 和甘油被机体吸收利用<sup>[5,9,14,17]</sup>。

啮齿动物的舌脂肪酶具有很强的脂肪分解活性, 它不仅能水解短链或中链 TAGs, 还可以水解碳链长达 C18 的 TAGs, 然而它对短链 TAGs 的水解速率远大于长链 TAGs, 且水解中链 TAGs 的速率比长链 TAGs 的速率高 5~8 倍, 同时研究还表明, 大鼠和人舌脂肪酶的水解具有底物特异性, 它们并不水解卵磷脂和胆固醇酯分子内的酯键<sup>[31]</sup>。该酶的最适 pH 值范围为 2.2~8.5, 最适作用温度

为 28~45 °C,如犊牛舌脂肪酶对三丁酸酯和 4-硝基苯基乙酸酯水解的最适 pH 值分别是 6.9 和 8.0,而羔羊舌脂肪酶的最适 pH 值分别是 6.6 和 6.8。牛、羊舌脂肪酶对硝基苯基乙酸酯的最适温度为 37.5 °C 和 30 °C<sup>[26]</sup>。

在人类等哺乳动物中,舌脂肪酶通常被认为是消化 TAGs 的辅助酶,其有助于促进后续胃脂肪酶对脂质的消化,这对于胰腺功能不全患者至关重要<sup>[32]</sup>。此外,舌脂肪酶在婴儿对乳脂的消化也具有非常重要的作用。由于新生婴儿的胰脂肪酶活性很低,舌脂肪酶在婴儿出生时就已经存在并发挥作用,其分泌受到摄食的影响,同时具备一定抗酸性,不易因酸性环境而失活。前人研究发现,膳食 TAGs 在婴儿胃中的高效水解主要归因于舌脂肪酶的作用,且婴儿哺乳时的吮吸过程,能够促进舌脂肪酶的分泌<sup>[33]</sup>。此外,还有研究者发现,舌脂肪酶对膳食脂肪的水解作用可能不仅限于胃,还可能在小肠的上部继续发挥作用,这也表明其具有相对宽泛的适宜 pH 值范围<sup>[11,34]</sup>。

胃脂肪酶是一种酸性环境稳定的脂肪酶,pH 值活性范围广泛,在 pH 值为 5.4 时,活性最佳,在 pH 值低于 2 或高于 7 的环境中,其活性迅速下降。与舌脂肪酶相似,胃脂肪酶水解 TAGs 的 Sn-3 位酯键,生成 DAGs 和 FFAs,且其对 Sn-3 酯键的活性是对 Sn-1 酯键的 2 倍<sup>[35]</sup>。除去少量 TAGs 的部分水解,膳食脂肪在口腔和胃部还完成了完全乳化,为小肠消化提供可吸附的乳化脂肪滴。婴儿摄入的乳脂正是一种天然设计的乳液,具有高度易消化性,因此,在胰脂肪酶未完全发育的婴儿体内,乳脂肪的消化主要依赖舌脂肪酶与胃脂肪酶<sup>[36]</sup>。在健康的成年人体内,膳食脂肪暴露在唾液中,其中的唾液黏蛋白配合咀嚼产生的混合力将其初步乳化,改变其分散状态,经历桥联絮凝和损耗絮凝作用形成粗乳状液<sup>[5,14,37]</sup>。短暂地在口腔中停留后,膳食脂肪进入胃部,胃部的强酸性环境和肌肉的蠕动作用能够交联或瓦解乳滴,最后,胃底部的胃窦收缩波和逆向射流运动使乳液的平均粒径减小到 25~30 μm,完成乳化<sup>[14,35]</sup>。

当膳食脂肪进入小肠后,会刺激胆囊收缩,让消化酶和胆汁分泌进入十二指肠。消化酶能够水解膳食脂肪,而胆汁中的胆盐为脂肪酶的界面吸

附创造了适宜的环境。膳食脂肪形成的乳糜颗粒进入小肠后,其表面界面膜会阻止脂肪酶的靠近,而胆盐能够在界面处竞争并取代吸附的两亲分子,帮助脂肪酶和膳食脂肪结合<sup>[14,16]</sup>。此外,脂质消化后的产物,如 MAGs、FFAs,以及溶解在脂质中的成分如脂溶性维生素、磷脂和胆固醇,能被胆盐从界面中移除,形成混合胶束或囊泡,穿过覆盖上皮壁的黏液层到达肠细胞,也使脂肪酶具有更加高效的水解效率<sup>[38]</sup>。

共脂肪酶是一种非酶促蛋白辅助因子,由 3 个由二硫桥定义的手指状区域组成,它与 PTL 的 C 端结构域相结合。在 PTL-共脂肪酶复合物晶体中,共脂肪酶的平面几乎垂直于 PTL C 端结构域的中心。由 44~46 和 65~87 残基和 Asp89 形成的 2 个发夹环与 PTL C 端结构域的各种 β-链中的氨基酸相互作用,其中极性相互作用、盐桥和氢键是主要的相互作用。这种结合使 PTL 的“盖子”结构域保持打开状态,吸附在胆盐涂层的膳食脂肪上进行消化。PTL 在碱性 pH 值(7.3~9.0)和 35~40 °C 下表现出最高的 TAG 水解活性。低浓度胆盐会刺激 PTL 活性,高浓度胆盐会抑制 PTL 活性。PTL 首先水解 Sn-1 酯键,再作用于 Sn-3 酯键,生成的 Sn-2 MAGs 通过分子重排/酰基转移将 Sn-2 位上的脂肪酸位移至 Sn-1 或 Sn-3 位,再次水解后,最终生成 FFAs 和甘油<sup>[15,35]</sup>。PTL 的家族成员 PLRP1 无脂肪酶活性;PLRP2 有更广泛的底物特异性,可以水解 TAGs、半乳糖脂和磷脂等物质,对于哺乳期的哺乳动物乳脂消化也非常重要。

磷脂酶中 PLA<sub>1</sub> 和 PLA<sub>2</sub> 分别水解 Sn-1 和 Sn-2 酰基,释放 FFAs 和溶血磷脂。已知有 6 种胞外 PLA<sub>1</sub> 酶和 3 种 PLA<sub>1</sub> 酶,胞外 PLA<sub>1</sub> 酶都属于脂肪酶基因家族,其中 PS-PLA<sub>1</sub>、EL、mPA-PLA<sub>1α</sub> 和 mPA-PLA<sub>1β</sub> 倾向于磷脂底物,而 HL 和 PLRP2 同时具有 PLA<sub>1</sub> 和水解 TAGs 的活性。其中,EL 和 HL 存在于血液中,与肝细胞或内皮细胞上的硫酸肝素蛋白聚糖结合,通过水解高密度脂蛋白颗粒上的磷脂和 TG 来调节高密度脂蛋白的水平。PS-PLA<sub>1</sub>、EL、mPA-PLA<sub>1α</sub> 和 mPA-PLA<sub>1</sub> 则分别特异性水解 PS 和 PA,并产生相应的溶血磷脂,具有多种生物学功能。从酵母到哺乳动物,胞内 PLA<sub>1</sub> 通常参与膜运输和细胞器维持,在此不进行分析。哺

乳动物胞外 PLA<sub>1</sub> 酶的功能简述见表 1<sup>[29]</sup>。

哺乳动物的基因编码超过 30 种 PLA<sub>2</sub> 酶,代表了一组非常多样化和广泛的酶。存在于小肠刷缘膜中的 PLA<sub>2</sub> 不仅具有 PLA<sub>2</sub> 活性,而且具有 Sn-1 溶血磷脂酶和甘油酯脂肪酶活性,后者可水解单酰基、二酰基和三酰基甘油。所有的 sPLA<sub>2s</sub> 的分子质量都约为 14 ku,并且需要 Ca<sup>2+</sup>在 8.0~9.0 的最佳 pH 值下有效水解底物磷脂,该水解没有任何脂肪酸选择性。cPLA<sub>2s</sub> 参与调节由细胞活化引起的脂质介质的产生,它的分子质量为 85 ku,同样也需要 Ca<sup>2+</sup>才能发挥其活性,并表现出对含有花生四烯酸的磷脂的优先水解。其余 PLA<sub>2s</sub> 活性的表现不需要 Ca<sup>2+</sup>的帮助<sup>[39]</sup>。

#### 4 脂肪酶抑制剂的研究进展

当前,高血脂、糖尿病、肥胖、非酒精性脂肪肝等慢性代谢类疾病是全球面临的重大健康威胁,由于脂肪酶在膳食油脂消化吸收和代谢方面的重要作用,以脂肪消化酶为调控靶点,缓解上述日益严峻的慢性代谢类疾病现状,成为近年来持续的研究热点。例如:通过开发高效的脂肪消化酶抑制剂,调控脂肪消化吸收,被认为是干预肥胖的有效方法之一。根据来源不同,目前脂肪酶抑制剂主要分为天然和化学合成两大类。

奥利司他是目前在临床上唯一注册使用的脂肪酶抑制剂减肥药物,是一种主要由利普司他汀还原得到的临床干预产品,它通过共价结合脂肪酶活性位点的 Ser 残基,发挥抑制脂肪酶活性作用<sup>[40]</sup>。其有益于缓解脂肪肝、胰岛素抵抗、高脂血症等症状,被广泛作为临床药物干预相关疾病<sup>[41]</sup>。除了奥利司他这种合成的脂肪酶抑制剂外,很多天然生物活性成分也具有抑制脂肪酶活性的作用,可作为临床药物的候选分子。例如,Kamoun 等<sup>[42]</sup>对天然香辛料八角、茴香中的生物活性物质进行分离,结合基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱等手段,确定了其中的类黄酮物质肉豆蔻精-5-甲基醚(M5ME),发现其能够与胃脂肪酶催化丝氨酸共价结合,发挥抑制胃脂肪酶的作用,这表明其具有成为胃脂肪酶抑制剂作为治疗肥胖等相关慢性代谢类疾病的潜力。

在成年人膳食油脂的肠道消化过程中,胃脂

表 1 哺乳动物胞外 PLA<sub>1</sub> 酶类型<sup>[29]</sup>

Table 1 Types of mammalian extracellular PLA<sub>1</sub> enzymes<sup>[29]</sup>

序号	种类	可能的功能
1	HL	高密度脂蛋白代谢
2	EL	高密度脂蛋白代谢
3	PLRP2	膳食磷脂消化
4	PS-PLA <sub>1</sub>	溶血磷脂酰丝氨酸合成、磷脂酰丝氨酸水解
5	mPA-PLA <sub>1</sub> α	溶血磷脂酸合成
6	mPA-PLA <sub>1</sub> β	溶血磷脂酸合成、TAGs 代谢

注:HL. 肝脂肪酶;EL. 内皮脂肪酶;PLRP2. 胰脂肪酶相关蛋白 2;PS-PLA<sub>1</sub>. 磷脂酰丝氨酸特异性 PLA<sub>1</sub>;mPA-PLA<sub>1</sub>α. 膜相关磷脂酸选择性 PLA<sub>1</sub>α;mPA-PLA<sub>1</sub>β. 膜相关磷脂酸选择性 PLA<sub>1</sub>β。

肪酶仅发挥有限的水解作用,胰脂肪酶发挥主要作用,因此,对胰脂肪酶活性进行调控对于缓解慢性代谢疾病可能更为关键。天然存在的胰脂肪酶抑制剂主要分为微生物源和植物源,植物源类胰脂肪酶抑制剂主要有多酚、黄酮、萜类、生物碱类、皂苷类等<sup>[43]</sup>。这些物质均为天然的功能活性物质,近年来受到广泛关注,研究者对其在调控胰脂肪酶活性方面进行了大量研究,相关的典型研究总结于表 2。

表 2 中列出了不同植物材料,如枸杞叶、红小豆、洋甘菊等,通过不同提取和制备方法得到抑制剂的研究结果。这些抑制剂根据成分主要可以分为黄酮类、酚类、多糖类等,其中多数以非竞争性抑制的方式降低胰脂肪酶的活性。乙醇法是植物源抑制剂提取和制备的主要方法,如红小豆、洋甘菊、板栗壳等。此外,还有超声波辅助双水相法、层析法、树脂纯化等提取方法。相关研究为深入理解这些天然胰脂肪酶抑制剂的功能特性,促进其在功能性食品方面的应用,实现脂肪酶活性调控,缓解相关代谢性疾病提供了一定的科学依据。

#### 5 结论与展望

膳食油脂是维持人体正常生命活动的重要宏量营养素,在人体营养代谢调控中起着重要作用,膳食油脂经口腔摄入后,在人体内的消化水解依赖于胃肠道中的各类脂肪消化酶,其消化过程与多种慢性代谢疾病风险相关。本文主要对膳食脂

表2 近年来天然活性物质作为胰脂肪酶抑制剂的典型研究

Table 2 Typical studies about natural bioactive components as pancreatic lipase inhibitors in recent years

来源	主要成分	提取与制备方法	安全摄入量及抑制方式	参考文献
枸杞叶	黄酮类	超声波辅助双水相法	IC <sub>50</sub> : 1.06 mg/mL	[44]
红小豆	黄酮类	乙醇浸提法	混合型抑制	[45]
洋甘菊	黄酮类	乙醇回流法	IC <sub>50</sub> : (1.09 ± 0.08) μg/mL	[46]
瑄溪蜜柚	黄酮类	Sephadex LH-20 葡聚糖柱层析法	非竞争性抑制 IC <sub>50</sub> : 0.99 μg/mL	[47]
板栗壳	黄酮类	醇提法	非竞争性抑制 IC <sub>50</sub> : 0.074 mg/mL	[48]
沙棘果皮	黄酮类	AB-8 大孔树脂纯化	非竞争性抑制 IC <sub>50</sub> : 12.46 mg/mL	[49]
红茶	酚类	热水浸提法	氢键、疏水作用	[50]
油菜蜂花粉	酚类	紫外和荧光光谱法	IC <sub>50</sub> : (1.670 ± 0.045) mg/mL	[51]
小黄姜	酚类	大孔树脂纯化法	—	[52]
决明子	多糖类	水提醇沉法	—	[53]
桑叶	多糖类	复合酶辅助热水提取法	非竞争性抑制 IC <sub>50</sub> : 10.32 mg/mL	[54]
苦瓜	多糖类	热水浸提法	非竞争性抑制 IC <sub>50</sub> : 29.86 mg/mL	[55]
长茎葡萄蕨藻	多酚、萜类、黄酮	醇提法	非竞争性抑制	[56]
山楂	—	HPLC、指纹图谱法	—	[57]
黑木耳	—	醇提法、水提法	非竞争性抑制	[58]

注: HPLC 为高效液相色谱法; IC<sub>50</sub> 为半数致死量; — 表示对应引用文献中未提供相关数据或信息。

肪的胃肠道消化过程、脂肪消化酶的酶学特征和水解特性展开综述,并阐述了近年来靶向脂肪消化酶的生物活性抑制剂的研究进展,以期促进对膳食脂肪消化过程及其调控的认识,为未来相关研究和营养健康食品制造提供参考。

膳食脂肪的消化过程复杂,涉及到舌脂肪酶、胃脂肪酶、PTL、PLRP1/2、PL 等多种脂肪酶的酶水解作用。膳食脂肪的主要成分为 TAGs,其经口腔咀嚼、胃幽门括约肌剪切挤压后,以乳脂肪液滴形式进入小肠,胰脂肪酶-共脂肪酶复合物与胆汁盐附着的乳脂肪滴结合,发挥持续的脂肪水解作用。这些脂肪消化酶的分子质量、整体结构、水解环境虽各不相同,但都具有经典的催化三元组。当脂肪酶的“盖子”结构打开,活性位点暴露时,膳食脂肪能够特异性与其结合,酯键断裂完成水解,这些膳食脂肪消化的终产物通过机体复杂的代谢过程,最终以脂滴的形式存储在脂肪组织中,膳食脂肪的消化和代谢失衡与肥胖、2型糖尿病、非酒精性脂肪肝等多种慢性代谢疾病风险密切相关。近年来,研究者基于枸杞叶、红小豆、洋甘菊等天然食品原材料,提取得到具有脂肪酶活性调控作用的天然功能活性成分,为相关慢性代谢疾病预防和

治疗提供了新思路,也为功能性食品和保健食品的开发利用提供了一定的理论依据。

然而,膳食脂肪的组成和胃肠道消化过程极其复杂,其脂肪酸类型和 TAGs 结构存在差异性。在胃肠道消化微环境中,脂肪的乳化形式、结构特征、盐类、生物分子等也均对脂肪水解消化产生重要影响,脂肪消化酶类在此过程中的结构活性、水解行为、产物组成特征等是否受到影响,其中的影响机制仍有待进一步研究。这对于明晰不同膳食脂肪的营养与功能特性,调控膳食脂肪摄入相关慢性代谢疾病的发生发展,并开发相关功能性脂质产品和营养保健食品,促进消费者健康,助力“健康中国”具有一定的理论指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] YE Z, XU Y J, LIU Y. Influences of dietary oils and fats, and the accompanied minor content of components on the gut microbiota and gut inflammation: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 113: 255–276.
- [2] FAWCETT C A, SENHORINHO G N A, LAAMANEN C A, et al. Microalgae as an alternative to oil

- crops for edible oils and animal feed[J]. *Algal Research*, 2022, 64: 102663.
- [3] JOUHET J, ALVES E, BOUTTÉ Y, et al. Plant and algal lipidomes: Analysis, composition, and their societal significance[J]. *Progress in Lipid Research*, 2024, 96: 101290.
- [4] PHAM T P T, HOANG T V, CAO P T N, et al. Comparison of Omega-3 polyunsaturated fatty acids bioavailability in fish oil and krill oil: Network Meta-analyses[J]. *Food Chemistry*, 2024, 24: 101880.
- [5] 叶展. 典型膳食脂肪胃肠道消化吸收特性及其对肠道健康的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.  
YE Z. Studies on characteristics of typical dietary oil gastrointestinal digestion and absorption, and their influences on gut health[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [6] PETIT V, SANDOZ L, GARCIA-RODENAS C L. Importance of the regiospecific distribution of long-chain saturated fatty acids on gut comfort, fat and calcium absorption in infants[J]. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 2019, 121: 40-51.
- [7] LIM S Y, STEINER J M, CRIDGE H. Lipases: It's not just pancreatic lipase[J]. *American Journal of Veterinary Research*, 2022, 83(8): 1-8.
- [8] NISHA Y, ATISH T P. Pancreatic lipase and its related proteins: where are we now[J]. *Drug Discovery Today*, 2024, 29(1): 103855.
- [9] MU H L, HOY C E. The digestion of dietary triacylglycerols [J]. *Progress in Lipid Research*, 2004, 43(2): 105-133.
- [10] KAWAI T, FUSHIKI T. Importance of lipolysis in oral cavity for orosensory detection of fat[J]. *American Journal of Physiology -Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2003, 285(2): 447-454.
- [11] BRIGNOT H, FERON G. Oral lipolysis and its association with diet and the perception and digestion of lipids: A systematic literature review[J]. *Archives of Oral Biology*, 2019, 108: 104550.
- [12] LAI W Y W, CHUA J W M, GILL S, et al. Analysis of the lipolytic activity of whole-saliva and site-specific secretions from the oral cavity of healthy adults[J]. *Nutrients*, 2019, 11(1): 191.
- [13] KULKARNI B V, MATTES R D. Lingual lipase activity in the orosensory detection of fat by humans [J]. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2014, 306(12): 879-885.
- [14] GOLDING M, WOOSTER T J. The influence of emulsion structure and stability on lipid digestion[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2010, 15(1/2): 90-101.
- [15] TILBEURGH H V, BEZZINE S, CABBILLAU C, et al. Colipase: Structure and interaction with pancreatic lipase[J]. *BBA-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1999(2/3): 173-184.
- [16] SARKAR A, YE A Q, SINGH H. On the role of bile salts in the digestion of emulsified lipids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 77-84.
- [17] MALDONADO -VALDERRAMA J, WILDE P, MACIERZANKA A, et al. The role of bile salts in digestion[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, 165(1): 36-46.
- [18] ZHU G Y, FANG Q, ZHU F S, et al. Structure and function of pancreatic lipase-related protein 2 and its relationship with pathological states[J]. *Frontiers in Genetics*, 2021, 12: 693538.
- [19] FIELD R B, REDMAN R S, CALLOWAY A M, et al. Effect of 24 hours light on circadian rhythms of secretory enzymes and morphology of rat von Ebner's glands[J]. *Archives of Oral Biology*, 1999, 44(11): 953-960.
- [20] VILLENEUVE P, PINA M, GRAILLE J. Determination of pregastric lipase specificity in young ruminants[J]. *Chemistry and Physics of Lipids*, 1996, 83(2): 161-168.
- [21] KATSUSHIMA H, KASHIWAGI N, HAMANO T T, et al. Fat taste receptors and fatty milk in dolphins [J]. *Marine Mammal Science*, 2025, 41(2): 13195.
- [22] DOCHERTY A J P, BODMER M W, ANGAL S, et al. Molecular cloning and nucleotide sequence of rat lingual lipase cDNA[J]. *Nucleic Acids Research*, 1985, 13(6): 1891-1903.
- [23] MILED N, CANAAN S, DUPUIS L, et al. Digestive lipases: From three-dimensional structure to physiology[J]. *Biochimie*, 2000, 82(11): 973-986.
- [24] ROUSSEL A, CANAAN S, EGLOFF M P, et al. Crystal structure of human gastric lipase and model of lysosomal acid lipase, two lipolytic enzymes of medical interest[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1999, 274(24): 16995-17002.
- [25] KUMAR A, CHAUHAN S. Pancreatic lipase in-

- hibitors: The road voyaged and successes[J]. Life Science, 2021, 271: 119115.
- [26] 杨汉博, 王峰. 动物消化道脂肪酶研究概述[J]. 饲料广角, 2009(5): 33-35.  
YANG H B, WANG F. Summarizing lipase research in the animal enteron[J]. Feed China, 2009(5): 33-35.
- [27] EYDOUX C, SPINELLI S, DAVIS T L, et al. Structure of human pancreatic lipase-related protein 2 with the lid in an open conformation[J]. Biochemistry, 2008, 47(36): 9553-9564.
- [28] 叶展, 徐勇将, 刘元法. 食用植物油脂制取与精炼技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 1-12.  
YE Z, XU Y J, LIU Y F. Research progresses on technologies for edible vegetable oil's preparation and refining[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 1-12.
- [29] INOUE A, AOKI J. Phospholipase A1: Structure, distribution and function[J]. Future Lipidology, 2006, 1(6): 687-700.
- [30] MURAKAMI M, TAKETOMI Y, MIKI Y, et al. Recent progress in phospholipase A<sub>2</sub> research: From cells to animals to humans[J]. Progress in Lipid Research, 2011, 50(2): 152-192.
- [31] LIAO T H, HAMOSH P, HAMOSH M. Fat digestion by lingual lipase: Mechanism of lipolysis in the stomach and upper small intestine[J]. Pediatric Research, 1984, 18(5): 402-409.
- [32] SAMER A, ASHLEY A V. A primer on exocrine pancreatic insufficiency, fat malabsorption, and fatty acid abnormalities[J]. The American Journal of Managed Care, 2017, 23(12): S203-S209.
- [33] SMITH L J, KAMINSKY S, DSOUZA S W. Neonatal fat digestion and lingual lipase[J]. Acta Paediatr, 1986, 75(6): 913-918.
- [34] FAVÉ G, COSTE T C, ARMAND M. Physicochemical properties of lipids: New strategies to manage fatty acid bioavailability[J]. Cellular and Molecular Biology, 2004, 50(7): 815-831.
- [35] ACEVEDO-FANI A, SINGH H. Biophysical insights into modulating lipid digestion in food emulsions[J]. Progress in Lipid Research, 2022, 85: 101129.
- [36] GROPPER S S, SMITH J L, GROFF J L. Advanced nutrition and human[M]. 5<sup>th</sup> ed. Belmont, CA, US: Wadsworth Publishing, 2009: 140-144.
- [37] GUO Q, YE A Q, BELLISSIMO N, et al. Modulating fat digestion through food structure design[J]. Progress in Lipid Research, 2017, 68: 109-118.
- [38] MEKKAOUI A, LIU Y, ZHANG P P, et al. Effect of bile salts on the interfacial dilational rheology of lecithin in the lipid digestion process[J]. Journal of Oleo Science, 2021, 70(8): 1069-1080.
- [39] MURAKAMI M, NAKATANI Y, ATSUMI G, et al. Regulatory functions of phospholipase A<sub>2</sub>[J]. Critical Reviews in Immunology, 2017, 37(2/3/4/5/6): 127-195.
- [40] 邱颀. 奥利司他及其中间体的合成研究进展[J]. 精细化工中间体, 2024, 54(2): 11-16.  
QIU B. Progress in the synthesis of orlistat and its intermediates[J]. Fine Chemical Intermediates, 2024, 54(2): 11-16.
- [41] LIU T T, LIU X T, CHEN Q X, et al. Lipase inhibitors for obesity: A Review[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2020, 128: 110314.
- [42] KAMOUN J, RAHIER R, SELLAMI M, et al. Identification of a new natural gastric lipase inhibitor from star anise[J]. Food & Function, 2019, 10(1): 469-478.
- [43] 胡幸华, 张紫佳. 脂肪酶抑制剂的研究进展[J]. 药学研究, 2024, 43(9): 903-908, 921.  
HU X H, ZHANG Z J. Recent advances of lipase inhibitors[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2024, 43(9): 903-908, 921.
- [44] 贾晓凤, 高蝶, 刘金旺, 等. 超声波辅助双水相法提取枸杞叶黄酮及其胰脂肪酶抑制活性[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 144-151.  
JIA X F, GAO D, LIU J W, et al. Extraction of flavonoids from goji (*Lycium barbarum* L.) leaves by ultrasonic-assisted two-phase aqueous method and the inhibitory activity of the extract on pancreatic lipase[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 144-151.
- [45] 郭庆丰, 周敬文, 卢文芳, 等. 红小豆提取物对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(9): 147-151, 157.  
GUO Q F, ZHOU J W, LU W F, et al. The inhibitory effects on  $\alpha$ -glucosidase and pancreatic lipase of extracts from adzuki bean[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(9): 147-151, 157.
- [46] 米热阿依·麦麦提, 王莹, 赵生俊, 等. 洋甘菊总黄酮成分分析及其对胰脂肪酶的抑制作用[J]. 化学与

- 生物工程, 2021, 38(6): 62-67.
- MIREAYI M, WANG Y, ZHAO S J, et al. Component analysis of total flavonoids from *Matricaria chamomilla* L. and their inhibitory effect on pancreatic lipase[J]. Chemistry & Bioengineering, 2021, 38(6): 62-67.
- [47] 晏幸, 肖文熙, 欧丽明, 等. 瑄溪蜜柚柚皮苷纯化鉴定及其对胰脂肪酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 1-7.
- YAN X, XIAO W X, OU L M, et al. Purification, identification and pancreatic lipase inhibitory effect of naringin from the peel of Guanxi honey pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) [J]. Food Science, 2022, 43(7): 1-7.
- [48] 黄雪薇, 雷嗣超, 涂芬, 等. 板栗壳黄酮结构分析及其对胰脂肪酶活力的抑制作用[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 111-118.
- HUANG X W, LEI S C, TU F, et al. Structural analysis and anti-pancreatic lipase activity of flavonoids from chestnut shells [J]. Food Science, 2021, 42(21): 111-118.
- [49] 孙嘉莉, 江峻峰, 牟晓娟, 等. 沙棘果皮渣总黄酮的纯化、成分分析及对胰脂肪酶的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 206-215.
- SUN J L, JIANG J F, MOU X J, et al. Purification and component analysis of total flavonoids from sea buckthorn peel residue and its anti-pancreatic lipase[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 206-215.
- [50] 陈光萱, 袁慧聪, 王旭. 红茶的体外模拟消化及TFDG对胰脂肪酶活性的抑制作用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(12): 59-65.
- CHEN G X, YUAN H C, WANG X. *In vitro* simulated digestion of black tea and inhibitory effect of TFDG on pancreatic lipase activity[J]. Food Research and Development, 2024, 45(12): 59-65.
- [51] 张楠, 胡童霞, 朱鑫麗, 等. 紫外和荧光光谱法研究油菜蜂花粉多酚对胰脂肪酶的作用过程[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 36-42.
- ZHANG N, HU T X, ZHU X L, et al. Study on the interaction process between rape bee pollen polyphenols and pancreatic lipase by ultraviolet and fluorescence spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 36-42.
- [52] 徐菁, 王秀芬, 刘晓燕. 姜酚纯化前后对胰脂肪酶抑制活性、抗氧化活性比较研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(5): 96-105.
- XU J, WANG X F, LIU X Y. Comparative study on pancreatic lipase inhibitory activity and antioxidant activity of gingerol before and after purification [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(5): 96-105.
- [53] 刘自平, 李瑾, 孟晓雅, 等. 决明子多糖对胰脂肪酶的抑制作用研究[J]. 黄河科技学院学报, 2021, 23(11): 78-81.
- LIU Z P, LI J, MENG X Y, et al. Study on the inhibitory effect of cassia seed polysaccharide on pancreatic lipase[J]. Journal of Huanghe S&T College, 2021, 23(11): 78-81.
- [54] 陈永丽, 黄俊僮, 王玲, 等. 桑叶多糖的化学组成及其对胰脂肪酶的抑制作用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 162-166.
- CHEN Y L, HUANG J T, WANG L, et al. Chemical composition of mulberry leaf polysaccharide and its inhibitory effect on pancreatic lipase[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 162-166.
- [55] 安欢, 叶云, 丁华杰, 等. 苦瓜多糖对胰脂肪酶抑制作用的研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(2): 27-31.
- AN H, YE Y, DING H J, et al. Study on the inhibitory effect of *Momordica charantia* polysaccharide on pancreatic lipase[J]. China Condiment, 2020, 45(2): 27-31.
- [56] 肖晔, 卢芯仪, 任天宇, 等. 长茎葡萄蕨藻提取物对胰脂肪酶与 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(3): 17-25.
- XIAO Y, LU X Y, REN T Y, et al. Inhibitory effects of *Caulerpa lentillifera* extracts on pancreatic lipase and  $\alpha$ -glucosidase[J]. Food Research and Development, 2023, 44(3): 17-25.
- [57] 高利兴, 戴衍朋, 石典花, 等. 基于指纹图谱和体外抗胰脂肪酶活性的疏熏山楂饮片质量分析[J]. 天津药学, 2022, 34(2): 8-13.
- GAO L X, DAI Y P, SHI D H, et al. Quality analysis of sulfur smoked hawthorn slices based on fingerprint spectrum and *in vitro* anti-pancreatic lipase activity[J]. Tianjin Pharmacy, 2022, 34(2): 8-13.
- [58] 黄琳翔, 施乐乐, 蔡志英, 等. 黑木耳中抑制胰脂肪酶活性物质的提取工艺及体外抑制效果[J]. 菌物学报, 2020, 39(2): 441-451.
- HUANG L X, SHI L L, CAI Z Y, et al. Extrac-

tion technology and inhibitory effects *in vitro* of substances inhibiting pancreatic lipase activities from

fruiting body of *Auricularia heimuer*[J]. *Mycosystema*, 2020, 39(2): 441–451.

## Research Progress on the Characteristics of Food Lipids Digestive Enzymes and the Natural Activity Inhibitors

ZHANG Mingchun<sup>1</sup>, DU Shumeng<sup>1</sup>, LIU Yuanfa<sup>2</sup>, YE Zhan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of Food Science and Resources, Wuxi 214122, Jiangsu*

**Abstract** The food lipids digesting enzymes are a general term refers to the enzymes that can hydrolyze ester bonds. These enzymes mainly participate in various of physiological processes, such as food lipids digestion, metabolism, and transportation, and play crucial roles in maintaining normal life activities in almost all the organisms. The lipases, including lingual lipase, gastric lipase, pancreatic lipase, etc. are the major lipases species that hydrolyze dietary fats within humans. After being ingested, these enzymes bind specifically to lipid droplets, hydrolyze the ester bonds within the glycerides, and ultimately generate free fatty acids and glycerols, then are absorbed and metabolized. By modulating the hydrolytic activity of lipases, the process of dietary food lipids hydrolysis can also be regulated. In the present review paper, firstly, the gastrointestinal digestion process of dietary food lipids was summarized. Secondly, the structural characteristics of the four major types of fat digesting enzymes, including the lingual lipase, gastric lipase, pancreatic lipase, and phospholipase, were elucidated, moreover, their hydrolysis properties towards dietary food lipids were also concluded. Finally, the research progress regarding the lipases natural activity inhibitors in recent years were also reviewed. The aims of the present review paper are to promote the basic understandings about the gastrointestinal digestion process of dietary food lipids, as well as the structure and functional characteristics of food lipids digestive enzymes. And provide theoretical references for regulating dietary lipids hydrolysis behavior based on the development of the natural products for food lipids digestive enzyme activity regulation, thus achieving the prevention of related chronic metabolic diseases.

**Keywords** food lipid digestive enzyme; dietary lipid; structural functionality; hydrolytic characteristics; activity inhibitor