环境昆虫学报 2024, 46 (5): 1255 - 1260



Journal of Environmental Entomology

李小雨,胡蝶,黄廷莉,姚洪渭,蒋彩英. 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的形态结构与理化性能 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (5): 1255 - 1260. LI Xiao-Yu, HU Die, HUANG Tin-Li, YAO Hong-Wei, JIANG Cai-Ying. Morphological structure and physicochemical properties of silk fibers from the cocoons of the parasitoid wasp, *Cotesia chilonis* (Matsumura) (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (5): 1255 - 1260.

# 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的形态结构与理化性能

# 李小雨1, 胡 蝶1, 黄廷莉1, 姚洪渭2, 蒋彩英1\*

(1.浙江理工大学生命科学与医药学院,杭州 310018; 2.浙江大学昆虫科学研究所,浙江省作物病虫生物学重点实验室, 水稻生物学国家重点为实验室,杭州 310058)

**摘要:**本文通过扫描电镜(SEM)、氨基酸分析、傅立叶红外光谱(FTIR)、X 射线晶体衍射(XRD)和热重分析(TG)等技术对二化螟盘绒茧蜂 Cotesia chilonis 茧丝纤维的微观形态、氨基酸类别与组成、二级结构和热稳定性等作了分析。结果表明,二化螟盘绒茧蜂的茧丝纤维表面较为粗糙,直径为 1.89 ± 0.04 μm。茧丝纤维主要由碳(60.67%)、氮(21.17%)和氧(17.22%)等元素组成,其丝蛋白主要成分包括天冬氨酸/天冬酰胺、丝氨酸和丙氨酸等;蛋白二级结构主要为β-折叠;其峰值降解温度为 332.27℃ ± 2.58℃。本文研究揭示了二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的结构特征与理化性能,为拓展该蜂的应用领域、开发性能优越的非蚕丝蛋白以及设计改造新型丝蛋白纤维提供基础。

关键词:二化螟盘绒茧蜂;茧;丝纤维;形态结构;理化性能
 中图分类号:Q964;S433
 文献标识码:A
 文章编号:1674-0858(2024)05-1255-06

# Morphological structure and physicochemical properties of silk fibers from the cocoons of the parasitoid wasp, *Cotesia chilonis* (Matsumura) (Hymenoptera: Braconidae)

LI Xiao-Yu<sup>1</sup>, HU Die<sup>1</sup>, HUANG Tin-Li<sup>1</sup>, YAO Hong-Wei<sup>2</sup>, JIANG Cai-Ying<sup>1\*</sup> (1. Zhejiang Sci-Tech University, College of Life Sciences and Medicine, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang University, Institute of Insect Sciences, Zhejiang Provincial Key Lab of Biology of Crop Pathogens and Insects, State Key Laboratory of Rice Biology, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In this paper, the morphological structure, amino acid composition, secondary structure and thermal stability of silk fibers from the cocoons of the parasitoid wasp, *Cotesia chilonis* (Matsumura) (Hymenoptera: Braconidae) were analyzed by the scanning electron microscopy (SEM), amino acid analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray crystallography (XRD) and thermogravimetric analysis (TG). The results showed that the surface of the silk fiber from *C. chilonis* cocoons was relatively rough, and its diameter was  $1.89 \pm 0.04 \,\mu$ m. It was mainly composed of elements such as carbon (60.67%), nitrogen (21.17%), and oxygen (17.22%). The protein components of *C. chilonis* cocoons mainly included aspartic acid/asparagine, serine and alanine. The secondary structure of silk proteins from *C. chilonis* cocoons was mainly  $\beta$ -sheet, and its peak degradation temperature was  $332.27 \pm 2.58^{\circ}$ C. This study reveals the ultrastructural characteristics and physicochemical properties of silk fibers from *C. chilonis* using the application field of *C. chilonis*, developing non-worm silk proteins with superior performance, and designing and transforming new silk protein fibers.

Key words: *Cotesia chilonis* (Matsumura); cocoon; silk fibers; morphological structure; physicochemical properties

作者简介: 李小雨, 女, 硕士研究生, 研究方向为生物化学与分子生物学, E-mail: 1351448527@qq.com \*通讯作者 Author for correspondence: 蒋彩英, 女, 副研究员, 研究方向为生物化学与分子生物学, E-mail: jcy@zstu.edu.cn 收稿日期 Received: 2023-07-15; 接受日期 Accepted: 2024-04-18

自然界广泛存在着动物吐丝现象。这在昆虫 中尤为普遍。昆虫对丝的利用主要表现在取食、繁 殖、扩散和自我防护等方面(邵正中,2015)。天 然动物丝具有独特的力学性能和理化性质。其 中,蚕丝是人们利用最早、产量最大的动物纤维 之一,具有"纤维皇后"的美誉(Vepari & Kaplan,2007;Sutherland *et al.*,2010)。蚕丝不仅 是重要的纺织工业原料,而且随着科技进步,蚕丝 蛋白在组织工程、再生医学、药物输送和医疗器 械等不同医学领域都得到广泛应用(Sahoo *et al.*, 2023)。当前,随着人们对昆虫丝作为可再生资源 制成结构材料的需求增加(Nickel & Riedel, 2001;Mathijsen,2016),非蚕昆虫丝的研究与开 发越来越受到重视。

近年来, 膜翅目 Hymenoptera 昆虫丝颇受关 注。与鳞翅目茧丝相比,蜜蜂 Apis mellifera 丝中丙 氨酸、丝氨酸、天冬氨酸和谷氨酸含量较高, 而 甘氨酸含量较低, 易形成 α-螺旋结构和螺旋线圈 为主(Sutherland et al., 2007)。丝角叶蜂 Nematus oligospilus 丝不仅具有昆虫丝的丙氨酸高含量特 征,而且具有胶原蛋白的甘氨酸和脯氨酸的高含 量特征,但又不含有动物胶原蛋白所特有的羟脯 氨酸,因此被推测可能是一类伪装成昆虫丝的新 型动物胶原蛋白(Sutherland et al., 2013)。红石 蜂 Osmia bicornis 茧含有 30.69%丝纤维,其中以丙 氨酸和谷氨酸含量较高,且富含矿物元素 (Murawska et al., 2022)。

寄生蜂是一类特殊的膜翅目昆虫,数量庞 大、种类繁多,营专性寄生生活(Pennacchio & Strand,2006)。其中,茧蜂科Braconidae是膜翅目 最大的科之一。近乎所有的茧蜂不是容性内寄生 蜂,就是抑性外寄生蜂。容性内寄生蜂的老熟幼 虫常钻出寄主,结茧于寄主体外,但少数如内茧 蜂亚科结茧于寄主体内。二化螟盘绒茧蜂 Cotesia chilonis 作为茧蜂科的重要内寄生蜂种类,是水稻 二化螟幼虫的优势寄生蜂,对我国和其他亚洲国 家稻田二化螟种群密度具有显著的自然调控作用 (陈华才等,2002)。目前,有关二化螟盘绒茧蜂

(李朝晖, 2019; Teng et al., 2022), 就其茧的丝 纤维性能及其利用等方面鲜有报道。为此,本研 究对二化螟盘绒茧蜂茧的丝纤维形态结构与理化 特性进行分析,为扩展该蜂的应用领域、开发性 能优越的非蚕丝蛋白以及设计改造新型丝蛋白纤 维提供基础。

## 1 材料与方法

#### 1.1 试虫饲养与蜂茧收集

供试的二化螟盘绒茧蜂及其寄主二化螟 Chilo suppressalis 均由浙江大学昆虫科学研究所提供。二 化螟在室内采用茭白饲养。取羽化第2天并交配后 的二化螟盘绒茧蜂雌成虫,寄生4龄二化螟幼虫, 待蜂幼虫老熟钻出寄主体外结茧、羽化后,收集 蜂茧。将蜂茧在 65°C烘箱内烘干过夜,后置于加 有食品干燥剂的密封样品箱内,室温下保存备 用。二化螟与二化螟盘绒茧蜂的室内饲养条件为 28°C±1°C、RH 65%±5%、光周期14L:10 D。

#### 1.2 茧丝纤维的场发射扫描电镜(FESEM)分析

取二化螟盘绒茧蜂茧,抽取单丝,用导电胶 将其固定在场发射扫描电镜(型号 VLTRA55,德 国 Zeiss 公司)的样品台上,在恒温干燥箱中放置 10 min 以去除水分;使用喷金仪和铂靶喷金 60 s, 然后在 3 kV 加速电压下,观察茧及其丝纤维的超 微形态结构。同时,对丝纤维进行 X 射线能谱分 析(EDS),分析丝纤维的元素组成及占比。

#### 1.3 茧丝纤维的氨基酸组分分析

取二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维,加入6mol/L盐酸后,置于电热鼓风恒温箱中水解,设置温度110℃±1℃,水解时间22h。结束后,使用日立自动氨基酸分析仪(型号LA8080,日本Hitachi公司)分析二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的氨基酸组成。

#### 1.4 茧丝纤维的傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

取适量蜂茧于 2 mL EP 管中,加入液氮和钢 珠,置于破碎仪(型号 JXFSTPRP-24,上海净信 公司)中将蜂茧制成粉末。破碎仪设置功率为 60%。

取 3~5 mg 蜂茧粉末和 300~500 mg 已干燥的溴 化钾粉末在研钵中混合研磨均匀,再将混合试样 移入压片机中制片。置于傅里叶红外光谱仪(型 号 IS20 FT-IR,美国 Nicolet 公司)中测试,扫描范 围为 400~4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>。使用 OMNIC 软件分析红外光谱数据,首先对图谱进行 自动基线矫正,再进行自动平滑,然后导出数据。使用 Peakfit 软件对红外数据酰胺 I 带(1600~1700 cm<sup>-1</sup>)子峰进行拟合。对拟合得到的峰进行归类,并计算各个二级结构的占比。

根据报道,1 610~1 637 cm<sup>-1</sup> 处的去卷积峰代 表 β-折叠结构,1 638~1 655 cm<sup>-1</sup> 处的去卷积峰代 表无规卷曲结构,1 656~1 662 cm<sup>-1</sup> 处的去卷积峰 代表 α-螺旋结构,1 663~1 696 cm<sup>-1</sup> 处的去卷积峰 代表 β-转角结构 (Yang *et al.*, 2015)。

#### 1.5 茧丝纤维的 X 射线衍射(XRD)分析

二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的晶体结构分析使 用 X 射线衍射仪(型号 EMPYREAN,荷兰 PANalytical 公司),采用 Cu Ka 靶(入射波长  $\lambda$  = 0.15418 nm),运行电压和电流分别为 45 kV 和 40 mA,扫描范围为 5~50°,扫描速度为 10°/min。

通常,在衍射角为 11.95°(0.740 nm)、24.02°(0.370 nm)附近的衍射峰,归属于 α-螺旋结构; 在衍射角为 16.71°(0.530 nm)、20.34°(0.436 nm), 24.49°(0.363 nm)、30.90°(0.289 nm)和 34.59° (0.259 nm)等附近的衍射峰归属于 β-折叠结构 (Fu *et al.*, 2011)。

#### 1.6 茧丝纤维的热重(TG)分析

使用热重分析仪(型号 TGA/DSC2,美国 Mettler Toledo 公司),在氮气保护条件下对二化螟 盘绒茧蜂茧丝纤维的热稳定性进行分析。温度范 围为室温至 800°C,升温速率为 10°C/min。

## 2 结果与分析

# 2.1 二化螟盘绒茧蜂茧及其丝纤维的超微形态与元素组成

二化螟盘绒茧蜂的单个茧呈白色椭圆体 (图1-A),长2.9±0.22 mm,宽0.94±0.1 mm。 对二化螟盘绒茧蜂的茧进行扫描电镜观察,发现 茧表面的丝纤维交错密布呈不规则网格状,未观 察到有草酸盐晶体(图1-B)。二化螟盘绒茧蜂茧 的丝由单根丝纤维组成,直径为1.89±0.04 µm,表 面较为粗糙(图1-C、D)。经EDS表征分析,二化 螟盘绒茧蜂茧丝的组成元素主要包括碳 (60.67%)、氮(21.17%)和氧(17.22%),以及 少量的硫(0.22%)、氯(0.42%)和钾(0.29%) 等。这表明二化螟盘绒茧蜂茧丝的主要成分为蛋 白质。





#### 2.2 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的氨基酸组成

二化螟盘绒茧蜂茧丝蛋白主要由天冬氨酸/天 冬酰胺(39.9%)、丝氨酸(27.7%)、丙氨酸 (16.6%)、甘氨酸(4.8%)和谷氨酸/谷氨酰胺 (2.1%)等组成(图 2)。





注: A, 丙氨酸; C, 半胱氨酸; D, 天冬氨酸/天冬酰胺; E, 谷氨酸/谷氨酰胺; F, 苯丙氨酸; G, 甘氨酸; H, 组 氨酸; I, 异亮氨酸; K, 赖氨酸; L, 亮氨酸; M, 甲硫氨 酸; P, 脯氨酸; R, 精氨酸; S, 丝氨酸; T, 苏氨酸; V, 缬氨酸; Y, 酪氨酸。Note: A, Alanine; C, Cysteine; D, Aspartic acid/Asparagine; E, Glutamic acid/Glutamine; F, Phenylalanine; G, Glycine; H, Histidine; I, Isoleucine; K, Lysine; L, Leucine; M, Methionine; P, Proline; R, Argnine; S, Serine; T, Threonine; V, Valine; Y, Tyrosine.

测算二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的特征氨基酸 比值,并与报道的家蚕 Bombyx mori 数据进行比 较。结果表明,二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的小侧 基氨基酸的比例相对较小,亲水性/疏水性氨基酸的比值较高,酸性氨基酸比值较大(表 1)。推测

二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维比家蚕茧丝更具吸湿 性,且更难结晶化。

表 1	1 二化螟盘绒茧蜂茧丝蛋白特征氨基酸的比值

Table 1 Ratio of characteristic amino acid in the silk from Cotesia chilonis cocoons			
类别*	二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维	家蚕丝**	
Туре	Silk fiber of Cotesia chilonis cocoons	Silk fiber of Bombyx mori cocoons	
小侧基/大侧基 Small/large side groups	1.095	2.569	
亲水性/疏水性 Hydrophilic/hydrophobic	3.853	2.927	
碱性/酸性 Basic/acidic	0.054	0.376	
甘氨酸/丙氨酸 Glycine/alanine	0.293	1.425	

注:\*带有小侧基氨基酸包含甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、苏氨酸、脯氨酸和组氨酸,其他为带有大侧基氨基酸;亲水性氨基 酸包含天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、酪氨酸、苏氨酸、精氨酸、赖氨酸和组氨酸,其他为疏水性氨基酸;碱性氨基酸包含 赖氨酸、精氨酸和组氨酸,酸性氨基酸包含天冬氨酸、谷氨酸(Sen et al., 2004)。\*\*数据来源邓婷婷(2017)。

Note: \* Amino acids with small side groups included glycine, alanine, serine, threonine, proline and histidine, the rest are amino acids with large side groups. Hydrophilic amino acids included aspartic acid, glutamic acid, serine, tyrosine, threonine, arginine, lysine and histidine, the rests were hydrophobic amino acids. Alkaline amino acids included lysine, arginine, and histidine, acidic amino acids included aspartic acid and glutamic acid (Sen et al., 2004). \*\* Data cited from Deng (2017).

#### 2.3 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的红外光谱

对二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维红外光谱(图 3) 中的酰胺 I 区域谱带(1 600~1 700 cm<sup>-1</sup>)进行去卷 积分析,结果表明二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的蛋 白二级结构以β-折叠和β-转角为主,α-螺旋和无规 卷曲相对较少(表 2)。

#### 2.4 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的晶体结构

在二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的 X 射线衍射图 谱中存在 2 个明显的强衍射峰,分别在衍射角 20 为 12.76°(晶面间距 d = 0.693 nm)和 19.53° (0.454 nm)附近(图 4)。其中,衍射角 20 为 12.76°的衍射峰归属于 α-螺旋结构, 19.53°衍射峰 归属于 β-折叠结构。因此,二化螟盘绒茧蜂茧丝 纤维中含有 β-折叠和 α-螺旋结构,这与红外光谱 的分析结果相一致。

表 2 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的二级结构含量

Table 2 Secondary structure composition of silk fibers from

<i>Cotesia chilonis</i> cocoons				
二级结构	二化螟盘绒茧蜂茧丝(%)			
Secondary structure	Silk fiber of Cotesia chilonis cocoons			
β-折叠 β-sheet	$40.50\pm0.62$			
β-转角 β-turn	$30.87 \pm 0.84$			
α-螺旋 α-helix	$14.50\pm0.50$			
无规卷曲 Random coil	$14.13\pm0.15$			



Fig. 3 Infrared spectra of silk fibers from Cotesia chilonis cocoons





 Image: A starting of silk fibers from Cotesia

 chilonis cocoons

#### 2.5 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的热稳定性

二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维从室温加热至 1 000℃过程中的质量变化,形成热重曲线 (TG); 对 TG 曲线一阶求导,获得微商热重曲线 (DTG) (图 5)。在室温至 120℃区间中,二化螟盘绒茧蜂 茧丝质量从 100%下降到 94.5%; 同时, DTG 曲线 出现与其相对应的微小热重损失峰,即该区段的 质量损失主要由纤维内部分子之间结合水被脱除 而引起。这表明二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维分子间 结合水的含量约为 5.5%。二化螟盘绒茧蜂茧丝纤 维的分解温区约为 200~420℃,表现为茧丝纤维出 现严重的分解反应。因此二化螟盘绒茧蜂茧丝纤 维在此加热过程中,先是纤维无定形区域分子链发 生移动,此后结晶区分子链随温度升高而逐步移 动,最后大分子链裂解。从 DTG 曲线可获得二化 螟盘绒茧蜂茧丝纤维的峰值降解温度为 332.27℃ ± 2.58°C。



## 3 结论与讨论

二化螟盘绒茧蜂老熟幼虫自寄主体表啮出后 即吐丝结茧,并在其中化蛹。本研究表明,二化 螟盘绒茧蜂茧由单根丝纤维构成,丝的直径为 1.89±0.04 µm。这比家蚕(直径为13~18 µm)和 其他蚕蛾如野蚕 Bombyx mandarina(直径为12~ 15 µm)、茶蚕 Andraca bipunctata(直径为10~ 14 µm)和樟蚕 Eriogyna pyretorum(直径为35~ 50 µm)等(诸鸿韬,2020)茧丝、以及膜翅目蜜 蜂丝(5.4±1.5 µm)(Zhang et al.,2010)等直径 均明显较小,可能与寄生蜂虫体及茧偏小有关。细 小的茧丝可能不一定适合巢丝工艺和丝绸产业化 应用,但可被改造用于制作环境友好的生物复合 材料,应用在精细程度要求较高的相关领域。

二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维主要由碳、氮和氧 等元素组成,表明其主要成分为蛋白质。这与已 报道的大多数昆虫丝主要由蛋白质组成的结果一 致。此外,在昆虫茧丝中通常还能检测到其他成 分。这可能与昆虫种类(Weisman et al., 2008)、 以及在泌丝结茧时将其周边环境中的树叶、木屑 和泥土等混入茧中有关(陈志勇, 2021)。在二化 螟盘绒茧蜂茧中能检测到多种氨基酸,其中以天 冬氨酸/天冬酰胺、丝氨酸和丙氨酸为主,甘氨酸 和谷氨酸/谷氨酰胺次之,未能检测到色氨酸。这 与蚕蛾丝的较高含量甘氨酸、丝氨酸、丙氨酸和 酪氨酸等氨基酸组成特征存在差异(邓婷婷, 2017)。在膜翅目中,3种胡蜂 Vespa simillima、 Polistes annularis 和 Vespula germanica 的丝都富含 丙氨酸和丝氨酸;意大利蜜蜂 Apis mellifera 和苜蓿 切叶蜂 Megachile rotundata 的丝富含丙氨酸和天冬 氨酸/天冬酰胺; 熊蜂 Bombus terrestris、弗菲卡特 牛头犬蚁 Myrmecia forficata 和黄猄蚁 Oecophylla smaragdina 等丝蛋白的氨基酸组成与二化螟盘绒茧 蜂茧丝的相似,均以天冬氨酸/天冬酰胺、丝氨酸 和丙氨酸含量相关较高;而印度跳蚁 Harpegnathos saltatorc 的丝蛋白则天冬氨酸/天冬酰胺、丝氨酸和 甘氨酸等为主(Campbell et al., 2014)。这表明不 同昆虫丝的氨基酸组成存在多样性,可能与不同 昆虫的生理特性以及环境适应性有关。

二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的小侧基氨基酸的 比例相对较低,亲水性/疏水性氨基酸的比值较 高。小侧基氨基酸含量高,肽链更易呈紧密、整 齐型排列,导致茧丝纤维结晶化增强;反之,肽 链链段排列欠规整,链段间或链段内产生较多空 隙,阻碍茧丝纤维结晶化。当亲水性氨基酸含量 较高时,亲水性基团多,导致茧丝纤维与水分子 间互相结合生成缔合水分子就多,即吸湿能力 好。因此,推测二化螟盘绒茧蜂茧丝比蚕丝更具 吸湿性且更难结晶化。二化螟盘绒茧蜂茧丝晶体 蛋白二级结构中,以β-折叠和β-转角的含量较高、 α-螺旋和无规卷曲的含量相当。这与蚕丝中以β-折 叠和β-转角的含量较高、无规卷曲含量次之、α-螺 旋含量较低的特征(Thorat *et al.*, 2020)有所不 同,这也表现为二化螟盘绒茧蜂茧丝双衍射峰与 蚕丝单衍射峰(邓婷婷, 2017)的差异。

不同昆虫丝的蛋白结构和功能不尽相同,但 通常都有相似的高度重复的氨基酸序列和高水平 的蛋白结晶度,其中大量的结晶成分使昆虫丝具 有非凡的稳定性和各种机械性能(Mathijsen, 2016)。二化螟盘绒茧蜂茧丝的热分解温度为 332.3℃,与家蚕丝的 334.0℃(邓婷婷,2017)并 无明显差异。这表明二化螟盘绒茧蜂茧丝与家蚕 丝在热稳定性上较为一致,且具有相似的热降解 过程,即二化螟盘绒茧蜂茧丝也是一种热性能较 好的生物材料。综上可见,根据二化螟盘绒茧蜂 茧丝的结构和理化特征,可用作动物丝(特别是 家蚕丝与蜘蛛丝)研发利用的替代资源。

尽管二化螟盘绒茧蜂茧体积相对于蚕茧明显 较小,但随着二化螟盘绒茧蜂室内繁育技术的不 断体系化以及生防应用的不断规模化,为蜂茧丝 的大规模开发应用提供了条件。今后可进一步解 析二化螟盘绒茧蜂茧丝的蛋白组成与结构,同时 借鉴蚕丝蛋白在生物高分子材料领域的研发成 果,开展二化螟盘绒茧蜂茧丝蛋白的生物工程设 计和改造,进而开发性能优越的非蚕丝蛋白材 料,拓展昆虫资源开发利用新途径。

#### 参考文献(References)

- Campbell PM, Trueman HE, Zhang Q, *et al*. Cross-linking in the silks of bees, ants and hornets [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2014, 48: 40-50.
- Chen HC, Lou YG, Cheng JA. Research and application of *Apanteles chilonis*, a parasitoid of rice striped stem borer *Chilo suppressalis* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2002, 18 (2): 90-93. [陈华才, 娄 永根, 程家安. 二化螟绒茧蜂研究与应用概况 [J]. 中国生物防治,

2002, 18 (2): 90-93]

- Chen ZY. Comparative Study on Structure, Properties and Composition of Lepidopteran Silk [D]. Chongqing: Southwest University Master Thesis, 2021. [陈志勇. 鳞翅目昆虫丝的结构性能与成分比较研究 [D]. 重庆: 西南大学硕士论文, 2021]
- Deng TT. Study on the Structure and Properties of *Bombyx mori* Silk, *Bombyx mandarina* Silk and *Antheraea assama* Silk [D]. Chongqing: Southwest University Master Thesis, 2017. [邓婷婷. 家蚕丝、野桑蚕丝及琥珀蚕 丝的结构和性能研究 [D]. 重庆: 西南大学硕士论文, 2017]
- Fu CJ, Porter D, Chen X, et al. Understanding the mechanical properties of Antheraea pernyi silk - from primary structure to condensed structure of the protein [J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21 (4): 729-737.
- Li ZH. Overwintering Characteristics of Main Parasitoids on *Chilo suppressalis* in Yangzhou Area and the Research and Application of *Cotesia chilonis* [D]. Yangzhou: Yangzhou University Master Thesis, 2019. [李朝晖. 扬州地区二化螟主要寄生蜂越冬特点及盘绒茧蜂的 研究应用 [D]. 扬州: 扬州大学硕士论文, 2019]
- Mathijsen D. Beyond carbon fiber: What will be the fibers of choice for future composites? [J]. *Reinforced Plastics*, 2016, 60 (1): 38-44.
- Murawska A, Migdał P, Zajdel B, et al. The composition of red mason bee cocoons [J] Journal of Apicultural Research, 2022, 61 (2): 227-232.
- Nickel J, Riedel U. Structural materials made of renewable resources (Biocomposites). In: Chiellini E, Gil H, Braunegg G, *et al.* eds. Biorelated Polymers: Sustainable Polymer Science Technology [C]. Boston: Springer, 2001: 27-40.
- Pennacchio F, Strand MR. Evolution of developmental strategies in parasitic Hymenoptera [J]. Annual Review of Entomology, 2006, 51: 233-258.
- Sahoo JK, Hasturk O, Falcucci T, et al. Silk chemistry and biomedical material designs [J]. Nature Reviews Chemistry, 2023, 7: 302-318.
- Sen K, Babu KM. Studies on Indian silk. I. Macrocharacterization and analysis of amino acid composition [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92 (2): 1080-1097.
- Shao ZZ. Silkworm Silk, Spider Silk, and Silk Proteins [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 1-30. [邵正中. 蚕丝, 蜘蛛丝及其丝蛋 白 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 1-30]
- Sutherland TD, Peng YY, Trueman HE, et al. A new class of animal collagen masquerading as an insect silk [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2864.
- Sutherland TD, Weisman S, Trueman HE, et al. Conservation of essential design features in coiled coil silks [J]. Molecular Biology Evolution, 2007, 24 (11): 2424-2432.
- Sutherland TD, Young JH, Weisman S, et al. Insect silk: One name, many materials [J]. Annual Review of Entomology, 2010, 55: 171-188.
- Teng ZW, Wu HZ, Ye XH, et al. An endoparasitoid uses its egg surface proteins to regulate its host immune response [J]. Insect Science, 2022, 29 (4): 1030-1046.
- Thorat L, Joseph E, Nisal A, et al. Structural and physical analysis of underwater silk from housing nest composites of a tropical chironomid midge [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 934-942.
- Vepari C, Kaplan DL. Silk as a biomaterial [J]. Progress in Polymer Science, 2007, 32 (8-9): 991-1007.
- Weisman S, Trueman HE, Mudie ST, *et al.* An unlikely silk: The composite material of green lacewing cocoons [J]. *Biomacromolecules*, 2008, 9 (11): 3065-3069.
- Yang H, Yang S, Kong J, *et al.* Obtaining information about protein secondary structures in aqueous solution using Fourier transform IR spectroscopy [J]. *Nature Protocols*, 2015, 10 (3): 382-396.
- Zhang K, Si FW, Duan HL, *et al*. Microstructures and mechanical properties of silks of silkworm and honeybee [J]. *Acta Biomaterialia*, 2010, 6 (6): 2165-2171.
- Zhu HT. Comparative Research on Silk and Silk Protein of Butterflies and Moths [D]. Chongqing: Southwest University Master Thesis, 2020. [诸 鸿韬. 蝶类与蛾类昆虫丝及丝蛋白的比较研究 [D]. 重庆: 西南大学 硕士论文, 2020]