番茄潜叶蛾神经肽的鉴定与序列分析*

张 鹤[1**] 付淑慧[1] 刘 霞[1] 赵诗宇[1]
白晓霞[1] 普范娇[1] 侯有明[2***]

（1. 忻州师范学院生物系，忻州 034000；2. 福建农林大学, 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室，福州 350002）

摘 要 【**目的**】神经肽是细胞间重要的信号调控分子，在调节昆虫多种生理和行为过程中起着关键作用。番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 是一种新近入侵我国的重大毁灭性害虫，为深入解析番茄潜叶蛾的神经肽组成及其变异特征，本研究对其神经肽基因进行了系统的鉴定和序列分析。【**方法**】通过同源比对方法检索番茄潜叶蛾基因组数据，筛选出编码神经肽的基因，并进行信号肽预测、成熟肽预测、保守基序分析和序列变异分析。【**结果**】在番茄潜叶蛾基因组中共鉴定出 56 个神经肽基因，这些基因的类别与其他鳞翅目昆虫一致，但一些基因在数量上存在差异。如鉴定到 1 个脂肪动员激素（Adipokinetic hormones，AKH）基因、2 个利尿激素（Diuretic hormone，DUH）家族基因和 8 个胰岛素样肽（Insulin-like peptide，ILP）基因，均少于其他昆虫。促前胸腺激素（Prothoraticotropic hormone，PTTH）基因在番茄潜叶蛾中扩张到 3 个转录本，其他鳞翅目昆虫通常只有 1 个。信息素合成激活肽（Pheromone biosynthesis activating neuropeptide，PBAN）和胰岛素样肽基因表现出不同寻常的结构变异，其中，信息素合成激活肽预测可以切割出 9 个成熟神经肽，其他鳞翅目昆虫只能切割出 5 个。虽然胰岛素样肽 ILP（Tabs017372.1）未预测到神经肽切割位点，但仍预测到包含 A 链和 B 链的保守半胱氨酸位点。此外，生殖素（Natalisin）在番茄潜叶蛾中具有最多数量的成熟肽，达 17 个。【**结论**】本研究对番茄潜叶蛾的神经肽基因进行了详细的统计和分析，发现促前胸腺激素、信息素合成激活肽和胰岛素样肽等存在一定程度变异，可能具有独特的调控机制。深入研究这些神经肽基因的表达和功能，有助于揭示其在昆虫生理中的作用，并为昆虫生态控制提供新思路。

关键词 番茄潜叶蛾；神经肽；促前胸腺激素；信息素合成激活肽

Identification and sequence analysis of neuropeptides of tomato leaf-miner, *Tuta absoluta*

ZHANG He[1**] FU Shu-Hui[1] LIU Xia[1] ZHAO Shi-Yu[1]
BAI Xiao-Xia[1] PU Fan-Jiao[1] HOU You-Ming[2***]

(1. Department of Biology, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China; 2. State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract **[Aim]** Neuropeptides are crucial signaling molecules between cells that regulate various physiological and behavioral processes in insects. The tomato leafminer, *Tuta absoluta*, is a recently invasive and highly destructive pest in China. To better understand the composition and variation of neuropeptides in *T. absoluta*, this study systematically identified and analyzed the neuropeptide genes of this species. [**Methods**] Neuropeptide-encoding genes were screened from *T. absoluta* genome data using homology-based searches. Subsequent analyses included signal peptide prediction, mature peptide prediction, conserved motif analysis, and sequence variation analysis. [**Results**] A total of 56 neuropeptide genes were identified in the *T. absoluta* genome. The categories of identified neuropeptide genes were consistent with those in other

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金联合基金项目（U22A20489）；山西省基础研究计划青年科学研究项目（202103021223365）；忻州师范学院科研基金资助项目（2021KY10）

**第一作者 First author，E-mail：zhhe1205@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：ymhou@fafu.edu.cn

收稿日期 Received：2024-05-23；接受日期 Accepted：2024-07-02

Lepidopterans, though some differences in quantity were noted. For example, only one adipokinetic hormone (AKH) gene, two diuretic hormone (DUH) genes, and eight insulin-like peptide (ILP) genes were identified, all of which are fewer than the number found in other insects. Conversely, the prothoracicotropic hormone (PTTH) gene has three transcripts in *T. absoluta*, whereas typically only one transcript is found in other insects. The pheromone biosynthesis activating neuropeptide (PBAN) and insulin-like peptide genes also exhibited unusual structural variations. PBAN was predicted to cleave into nine mature neuropeptides, whereas in other Lepidopterans this typically cleaves into only five. In addition, the insulin-like peptide ILP (Tabs017372.1) did not have a predicted neuropeptide cleavage site but still contained conserved cysteine residues in the A and B chains. Furthermore, natalisin in *T. absoluta* had the highest number of mature peptides (up to 17). [**Conclusion**] This study provides a detailed identification and analysis of neuropeptide genes in *T. absoluta*, revealing significant variations in PTTH, PBAN, and ILP that may indicate unique regulatory mechanisms. Understanding the expression and function of these neuropeptide genes will shed light on their roles in insect physiology and provide new insights for ecological pest control strategies.

Key words *Tuta absoluta*; neuropeptides; prothoraticotropic hormone; pheromone biosynthesis activating neuropeptide

神经肽是一类由神经内分泌细胞分泌的信号分子，负责调节细胞间信号的传递（Nässel，2002）。神经肽通过与对应受体的相互作用和后续信号转导来调节昆虫的行为和生理过程，包括昆虫的取食、繁殖、学习和记忆、压力和成瘾、昼夜节律、睡眠、社会行为等，以及生长发育、蜕皮、消化、能量稳态、水和离子平衡与代谢等生理过程（Schoofs *et al.*，2017；Nässel and Zandawala，2019）。神经肽的前体蛋白主要在神经元和内分泌细胞中生成，然后通过酶在特定位置裂解并进一步修饰，生成具有生物活性的成熟肽，这些成熟肽被分泌到细胞外环境中，通过激活其对应的 G 蛋白偶联受体起作用（Yeoh *et al.*，2017）。

近年来，随着基因组学和蛋白质组学的快速发展，昆虫神经肽的研究更加深入，神经肽的新功能和新机制不断被发掘（Nässel and Zandawala，2019；Kim *et al.*，2021）。神经肽已在多种昆虫的基因组和转录组中被注释和鉴定，包括几种模式生物如黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*（Nässel and Winther，2010）、意大利蜜蜂 *Apis mellifera ligustica*（Hummon *et al.*，2006）、家蚕 *Bombyx mori*（Roller *et al.*，2008）和赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*（Li *et al.*，2008），以及一些重要的农林害虫如欧洲松树皮甲 *Hylobius abietis*（Pandit *et al.*，2018）、红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus*（Zhang *et al.*，2020）、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*（Llopis-Giménez *et al.*，2019）、二化螟 *Chilo suppressalis*（Xu *et al.*，2016）、大蜡螟 *Galleria mellonella*（Luo *et al.*，2024）、草地贪夜蛾 *S. frugiperda*（Shi *et al.*，2021）、核桃举肢蛾 *Atrijuglans hetaohei*（Li *et al.*，2020）和烟粉虱 *Bemisia tabaci*（Li *et al.*，2021）。目前，已鉴定出大约 50 个昆虫神经肽家族，尤其是在模式生物如黑腹果蝇、家蚕和赤拟谷盗中，其功能得到了详细研究（Nässel and Winther，2010；Nässel and Zandawala，2019；Kh and Keshan，2021）。这些研究表明，不同目之间，甚至同目不同种之间，神经肽的类别和序列存在一定差异（Veenstra，2014，2019；Luo *et al.*，2024）。神经肽几乎参与所有生理过程，昆虫神经肽及其 G 蛋白偶联受体是新一代农药的潜在目标（Van Hiel *et al.*，2010；Birgül *et al.*，2021）。对害虫神经肽的鉴定和功能验证不仅有助于理解其信号转导机制，还可能为害虫综合防治提供新途径，促进更加有效和生态友好防治方法的发展。

番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 原产于南美洲，是一种全球范围内的重要检疫性害虫。在短短十几年间，该虫从原产地扩散至几乎整个亚非欧大陆（Biondi *et al.*，2018）。2017 年，番茄潜叶蛾首次在我国新疆伊犁发现，目前已在多个省市相继出现（张桂芬等，2019；陆永跃，2021；Zhang *et al.*，2021）。该虫主要以幼虫潜食叶片为害，严重发生时可导致主要寄主作物番茄减产 80%-100%，对我国番茄产业及其他相关产业的健康发展构成了极大威胁（张桂芬等，2018；屈

春侠等，2021）。本研究利用番茄潜叶蛾的基因组数据（Liu *et al.*，2023），对其神经肽编码基因进行了系统的鉴定和序列分析，为确定神经肽信号系统在番茄潜叶蛾发育和行为调控中的作用奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 神经肽预测

番茄潜叶蛾的基因组数据从 InsectBase 2.0（http://v2.insect-genome.com/）下载。在 TBtools-II 软件（Chen *et al.*，2023）的 BLAST 模块中，以黑腹果蝇（Nässel and Winther，2010）、赤拟谷盗（Li *et al.*，2008）、家蚕（Roller *et al.*，2008）、大蜡螟（Luo *et al.*，2024）和草地贪夜蛾（Shi *et al.*，2021）等昆虫的神经肽基因作为参考，进行番茄潜叶蛾蛋白库的同源性检索。根据同源性筛选出番茄潜叶蛾的神经肽前体基因，并利用 NCBI BLAST 进一步验证。

1.2 神经肽序列分析

利用 NCBI ORF Finder（https://www.ncbi.nlm.nih.gov/orffinder/）预测候选基因的开放阅读框（Open Reading Frames，ORFs）；使用在线程序 SignalP 6.0（https://services.healthtech.dtu.dk/services/SignalP-6.0/）评估每个推导出的神经肽前体是否存在信号肽。神经肽切割位点预测基于神经肽的切割原则，通常是肽两侧的赖氨酸（K）和精氨酸（R）的组合（Veenstra，2000），或通过与已知节肢动物前体肽加工方案的同源性进行预测。神经肽的多序列比对分析利用 TBtools-II 软件（Chen *et al.*，2023）中的 Muscle Wrapper 进行，系统发育树的构建采用 TBtools-II 软件中的“One step Build a ML Tree”功能，使用 trimAI 修剪比对结果，自动筛选氨基酸替换模型，并进行 5 000 次自展检验，自展检验数值显示在树的分支上。树的美化修饰通过 FigTree 1.4.4 完成。神经肽序列的一致性分析利用在线程序 WebLogo（http://weblogo.berkeley.edu/logo.cgi）进行，神经肽结构图由在线程序 IBS：Illustrator for Biological Sequences（http://ibs.biocuckoo.org/online.php）绘制。

2 结果与分析

2.1 番茄潜叶蛾神经肽前体基因的鉴定

在番茄潜叶蛾基因组中，共鉴定出 56 个神经肽基因，均获得完整的开放阅读框（表 1）。

表 1 番茄潜叶蛾神经肽信息统计

Table 1 The neuropeptide information statistics of *Tuta absoluta*

神经肽基因 Neuropeptide genes	基因编号 Accession no.	开放阅读框（aa） ORF (aa)	信号肽（aa） SP (aa)	成熟肽数量 Number of mature peptides	预测的成熟肽序列或保守基序 Predicted mature peptide sequences or conserved motifs
ACP	Tabs012531.1	88	25	1	pQITFSRDWTGa×1
AKH	Tabs017661.1	89	40	1	pQLTFTSSWGa×1
AstA	Tabs009787.1	220	18	9	-YxFGLa×7; -FxFGLa×2
AstB	Tabs021021.1	292	19	13	AWxDLxxxWa×5; GWxDMSSAWa×6; QPEKWSQFHGAWa×1; EPGWTNLRGMWa×1
AstC	Tabs009100.1	124	25	1	pQVRFRQCYFNPISCF×1
AstCC	Tabs020660.1	114	18	1	pGPQPPRVRVIHCYFNAVTCF×1
AT	Tabs002248.1	130	21	1	GFKNIEMLTARGFa×1
Burα	Tabs012652.1	157	25	1	-$Cx_{13}Cx_{9}Cx_{3}Cx_{17}CxCCx_{13}Cx_{20}CxCxxC$-×1
Burβ	Tabs016620.1	137	23	1	-$Cx_{23}Cx_{8}Cx_{3}Cx_{17}CxCCx_{14}Cx_{25}CxCxxC$-×1
Cal-B	Tabs018862.1	151	16	3	CVNMWDxGCVNGQLxGAGxDDYYLxGGGFNPa×3
CAPA	Tabs002177.1	184	21	3	-LYxFPRVa×2; -MWFGPRLa×1

续表 1 (Table 1 continued)

神经肽基因 Neuropeptide gene	基因编号 Accession no.	开放阅读框（aa） ORF (aa)	信号肽（aa） SP (aa)	成熟肽数量 Number of mature peptides	预测的成熟肽序列或保守基序 Predicted mature peptide sequences or conserved motifs
CCAP	Tabs013567.1	126	23	1	PFCNAFTGCa×1
CCHa1	Tabs000517.1	176	32	1	GGSCLSYGHSCWGAHa×1
CCHa2	Tabs008773.1	132	22	1	GCSAFGHSCFGGHa×1
Crz	Tabs010817.1	104	19	1	pQTFQYSRGWTNa×1
DUH31	Tabs006744.1	105	24	1	GLDLGLTRGYSGSLHAKHLMGMAAAHSSGGPa×1
DUH45	Tabs014455.1	154	20	1	KMPSLSINNPMEVLRQRLMMEVARKQMREASQRQAVANRVFLQNVa×1
EH	Tabs017540.1	91	26	1	-$Cx_3Cx_2Cx_{12}Cx_3Cx_{10}C$-×1
ETH	Tabs014815.1	109	20	2	TFIKPNNVPRVa×1; SNEAEGPFDQSAMGYVIKSLPSKNIPRMa×1
FMRFa	Tabs003718.1	186	24	5	SAIDRSLVRFa×1; ASSNFLRFa×1; -FxRLa×3
GPα2	Tabs014913.1	117	16	1	-$Cx_{13}Cx_9Cx_3Cx_{22}CCx_{13}Cx_{14}CxCxxC$-×1
GPβ5	Tabs020473.1	181	22	1	-$Cx_{18}Cx_8Cx_3Cx_{12}Cx_8Cx_3Cx_{19}Cx_{14}Cx_{18}CxCxxCx_6C$-×1
IDL	Tabs006692.1	198	26	1	LDLNRLYGHHT×1
IMFa	Tabs006647.1	78	28	1	NYKNAPMNGIMFa×1
ITP	Tabs020806.1	113	21	1	-$Cx_{15}Cx_2Cx_{12}Cx_3Cx_8C$-×1
ITG	Tabs003122.1	243	46	2	KQYNEDCQTSSECDITRGLCCIMQ×1; HRQKARKSCGYFKEPLVCIGPVATDQIREFVQHTNGE×1
ILP	Tabs016358.1	130	20	1	B 链（B-chain）：-Cx_3Lx_7C-×7
	Tabs021807.1	101	20	1	A 链（A-chain）：-CCx_3Cx_7YC-×7
	Tabs000564.1	140	19	1	
	Tabs009817.1	127	17	1	
	Tabs020854.1	78	--	1	
	Tabs019737.1	142	25	1	
	Tabs015136.1	233	24	1	
	Tabs017372.1	123	42	1	-$Cx_3Lx_7C_{X38}CC_{X3}C_{X8}C$-×1
Kinin	Tabs009055.1	336	18	3	-FSPWGa×2; -FSAWGa×1
LQDVa	Tabs020079.1	118	33	1	SYIDPGDEDVEVNLSDYGDDPADLQLLHDVa×1
MS	Tabs009571.1	94	22	1	pQDVVHSFLRFa×1
NTL	Tabs009979.1	551	22	17	-PFWGxRa×13; -PFWPNRa×1; -PFFISRa×1; -PYYIARa×1; -PYFASRa×1
NP	Tabs017006.1	85	20	1	-$CxCx_4Cx_7Cx_{10}CxCCxxCx_7Cx_6Cx_5Cx_4C$-×1
NPF1	Tabs011798.1	121	22	1	DVSDGDRVDPDILDRAVRLLQLHNLDRLYSYHTRPRYa×1
NPF2	Tabs000374.1	94	21	1	QYPRPRRPERFDTAEQISNYLKELQEYYSVHGRGRYa×1
NPLP	Tabs001632.1	468	--	6	NIAALAREGYLKAAVNGF×1; SISTLAKNGQLPTFSSPYDETDKTEEEQDGSHE×1; HIASIARMRSYSAM×1; NVQALARDGYRGGRSQLQQD×1; NIQAMARNGMIN×1; HIGSLARLGLLPSFRFGGG×1

续表 1 (Table 1 continued)

神经肽基因 Neuropeptide gene	基因编号 Accession no.	开放阅读框 (aa) ORF (aa)	信号肽(aa) SP (aa)	成熟肽数量 Number of mature peptides	预测的成熟肽序列或保守基序 Predicted mature peptide sequences or conserved motifs
NVP	Tabs020874.1	376	18	3	GSGTKVGGAGAATKVATKNGSG×1; GSGTKVGGAAASAKTATKNSGN×1; LYANKV×1
OK-A	Tabs008093.1	213	34	3	NFDEIDQTSLPLS×1; LSPLADYPMDEIDVSNFPIGS×1; GGDWPMDEIDASYFPVGS×1
OK-B	Tabs000878.1	89	--	6	FVDSLGGGNLV×2; NLDSLGGGNLV×3; NLDSIGGPNLV×1
PBAN	Tabs018939.1	246	21	9	-LWFGPRLa×1; -YSPRLa×2; -VIFTPRPa×1; -VIFRPILa×1; -VDFTPRLa×1; -DMTFSPRLa×3
PDF	Tabs010380.1	177	23	1	NADLINSILALPKGMNDAa×1
PTTH	Tabs013066.1	219	24	1	-CxCx$_{22/24}$Cx$_3$Cx$_5$Cx$_n$CxC-×3
	Tabs004037.1	211	28	1	
	Tabs007689.1	219	21	1	
RYa	Tabs017225.1	128	30	2	AERESQLAQAPFIMGSRFa×1; NDKFFFSSRYa×1
sNPF	Tabs018933.1	214	67	3	-RxPxxRLRFa×3
SIFa	Tabs011099.1	70	23	1	FAKKPLFNGSIFa×1
SK	Tabs010983.1	73	24	1	SARADDAFDDYGHLRFa×1
TRP	Tabs007266.1	257	22	5	-GFxGMRa×3; AAGIHQFFGVRa×1; PYDLTFRGKFIGVR×1
TR	Tabs006100.1	152	19	1	-CxxCx$_3$Cx$_3$Cx$_7$CC-×1

ORF：开放阅读框；SP：信号肽；ACP：酯动员激素相关神经肽；AKH：脂肪动员激素；AstA：咽侧体抑制激素；AT：促咽侧体素；Burα：鞣化激素 α 亚基；Burβ：鞣化激素 β 亚基；Cal-B；降钙素-B；CAPA：能量肽；CCAP：甲壳类刺激心脏肽；CCHa：CCHamide 神经肽；Crz：黑化诱导激素；DUH：利尿激素；EH：蜕壳激素；ETH：蜕皮触发激素；FMRFa：FMRFamide 神经肽；GPα2：糖蛋白激素 α2；GPβ5：糖蛋白激素 β5；IDL：IDL-like 神经肽；IMFa：IMFamide 神经肽；ITP：离子转运肽；ITG：ITG-like 神经肽；ILP：胰岛素肽类；Kinin：激肽；LQDVa：LQDVamide 神经肽；MS：肌抑肽；NTL：生殖素；NP：蝗抗利尿肽；NPF：神经肽 F；NPLP：神经肽样前体；PBAN：信息素生物合成激活肽；PDF：色素分散激素因子；PTTH：促前胸腺激素；RYa：Ryamide 神经肽；sNPF：短神经肽 F；SIFa：SIFamide 神经肽；SK：硫激肽；TRP：速激肽；TR：Trissin 神经肽；“--”：没有预测到信号肽；x：可变氨基酸残基，其下标数字表示间隔的氨基酸残基数；N 端小写字母：谷氨酰胺/谷氨酸的环化；C 末端小写字母 a：甘氨酸残基的酰胺化。
ORF: Open reading frame; SP: Signal peptide; ACP: Adipokinetic hormone/corazonin-related peptide; AKH: Adipokinetic hormones; AstA: Allatostatin; AT: Allatotropin; Burα: Bursicon alpha; Burβ: Bursicon beta; Cal-B: Calcitonin-B; CAPA: Capability; CCAP: Crustacean cardioactive peptide; CCHa: CCHamide neuropeptide; Crz: Corazonin; DUH: Diuretic hormone; EH: Eclosion hormone; ETH: Ecdysis-triggering hormone; FMRFa: FMRFamide neuropeptide; GPα2: Glycoprotein hormone alpha2; GPβ5: Glycoprotein hormone beta5; IDL: IDL-like neuropeptide; IMFa: IMFamide neuropeptide; ITP: Ion-transport peptide; ITG: ITG-like neuropeptide; ILP: Insulin-like peptide; LQDVa: LQDVamide; MS: Myosupressin; NTL: Natalisin; NP: Neuroparsin; NPF: Neuropeptide F; NPLP: Neuropeptide-like precursor; OK-A: Orcokinin A; OK-B: Orcokinin B; PBAN: Pheromone biosynthesis activating neuropeptide; PDF: Pigment dispersing factor; PTTH: Prothoraticotropic hormone; RYa: Ryamide neuropeptide; sNPF: Short neuropeptide F; SIFa: SIFamide; SK: Sulfakinin; TRP: Tachykinin-related peptide; TR: Trissin; “--”: No predicted signal peptide; “x”: A variable amino acid residue, with the subscript number indicating the number of intervening amino acid residues; Lowercase letters at the N-terminus: Cyclization of glutamine/glutamic acid; “a” at the C-terminus: Amidation of a glycine residue.

大多数神经肽前体在 N 端包含 1 个信号肽，然而胰岛素样肽（Insulin-like peptide，ILP）（Tabs020854.1）、Orcokinin B（OK-B）和神经肽样前体（Neuropeptide-like precursor，NPLP）

这 3 个基因没有预测到信号肽。39 个神经肽基因预测仅能切割出 1 个成熟肽，而 A 型咽侧体抑制激素（A-type allatostatin，AstA）和信息素合成激活肽（Pheromone biosynthesis activating neuropeptide，PBAN）分别可切割出 9 个成熟肽，B 型咽侧体抑制激素（B-type allatostatin，AstB）可切割出 13 个成熟肽，生殖素（Natalisin，NTL）可切割出多达 17 个成熟肽。

许多成熟肽具有保守的氨基酸基序，如脂肪动员激素（Adipokinetic hormones，AKH）的 pQx6WGa 基序、AstA 成熟肽 C 末端的-Y/FxFGLa 基序、AstB 的-Wx_6Wa 基序、能量肽（Capability，CAPA）的-PRV/La 基序、甲壳类刺激心脏肽（Crustacean cardioactive peptide，CCAP）的 PFCNAFTGCa 序列、CCHamide（CCHa）的 Cx_6Cx_3Ha 结构、蜕皮触发激素（Ecdysis-triggering hormone，ETH）的-PRX/Ma 基序、FMRFamide（FMRFa）的-FxRF/La 基序、激肽（Kinin）的-FxxWGa 基序、神经肽 F2（Neuropeptide F2，NPF2）的-RxRYa 基序、信息素合成激活肽（Pheromone biosynthesis activating neuropeptide，PBAN）的-FxPRLa 基序、SIFamide（SIFa）的-SIFa 基序和速激肽（Tachykinin-related peptide，TRP）的-FxGxRa 基序。此外，鞣化激素 α 亚基和 β 亚基（Bursicon alpha and beta，Burα and Burβ）、蜕壳激素（Eclosion hormone，EH）、糖蛋白激素 α2 亚基和 β5 亚基（Glycoprotein hormone alpha 2 and beta 5，GPα2 and GPβ5）、离子转运肽（Ion-transport peptide，ITP）、胰岛素样肽（Insulin-like peptide，ILP）、蝗抗利尿肽（Neuroparsin，NP）、促前胸腺激素（Prothoraticotropic hormone，PTTH）和 Trissin（TR）均具有特定的半胱氨酸基序。

部分神经肽发生了变异，例如 LQDVamide（LQDVa）的 C 末端突变为-LHDVa，Ryamide（Rya）突变为 RFa，神经肽 F1（Neuropeptide F1，NPF1）的 C 末端在其他昆虫中为-RxRFa，但在番茄潜叶蛾中为-RxRYa。通常，ILP 可切割出 2 个成熟肽（A 链和 B 链），A 链和 B 链分别有 4 和 2 个保守的半胱氨酸基序。ILP（Tabs017372.1）仅预测出 1 个成熟肽，但其前体蛋白包含 A 链和 B 链的特征。

2.2　促前胸腺激素基因在番茄潜叶蛾中扩张

在大多数昆虫中，仅有 1 个促前胸腺激素 PTTH 基因的转录本。然而，在番茄潜叶蛾基因组中鉴定出 3 个 PTTH 神经肽基因的转录本，均具有典型的半胱氨酸结构（表 1）。系统发育分析显示，番茄潜叶蛾的 3 个 PTTH 基因聚为 1 个分支，PTTH2 和 PTTH3 具有较高的相似性，与其他鳞翅目昆虫的 PTTH 基因聚为 1 个大分支（图 1）。表明 PTTH 神经肽基因在番茄潜叶蛾中发生了扩张。

2.3　番茄潜叶蛾信息素合成激活肽基因发生变异

由图 2（A）可知，蛾类昆虫的信息素合成激活肽（Pheromone biosynthesis activating neuropeptide，PBAN）基因通常可以切割出 5 个成熟肽：滞育激素（Diapause hormone，DH）、信息素合成激活肽和 3 个食道下神经节神经肽（α-, β-, γ-subesophageal ganglion neuropeptides，α-, β-, γ-SGNP）。与其他蛾类昆虫相比，番茄潜叶蛾的 PBAN 基因编码区（246 个氨基酸）较长，预测可切割出 9 个成熟肽，除了上述 5 个常规成熟肽外，还包括 4 个未知功能的成熟肽（x1-x4）。其中，x1 成熟肽位于 α-SGNP 和 β-SGNP 之间，x2、x3 及 x4 位于 PBAN 和 γ-SGNP 之间。

多序列比对分析图 2（B）表明，蛾类昆虫 DH 成熟肽的 N 端变异较大，但 C 端具有保守的-WFGPRL 基序。蛾类 α-SGNP 成熟肽的 C 端具有保守的-FTPKL 基序，番茄潜叶蛾的 α-SGNP 和 x1 成熟肽与蛾类 α-SGNP 的序列相似性较高，但在保守位点发生了氨基酸变异，番茄潜叶蛾 α-SGNP 的 C 端变异为-FTPRP，x1 成熟肽变异为-FRPIL。蛾类昆虫 β-SGNP 成熟肽在 N 端变异较大，C 端具有保守的-FTPRL 基序。蛾类昆虫 PBAN 成熟肽的 C 端具有保守的-YFSPRL 基序，但番茄潜叶蛾缺失了“F”残基。番茄潜叶蛾的 x2、x3 和 x4 与蛾类 γ-SGNP 具有较高的序列相似性，除 x2 外，C 端具有保守的-FSPRL 基序，x2 的 C 端为-YSPRL。

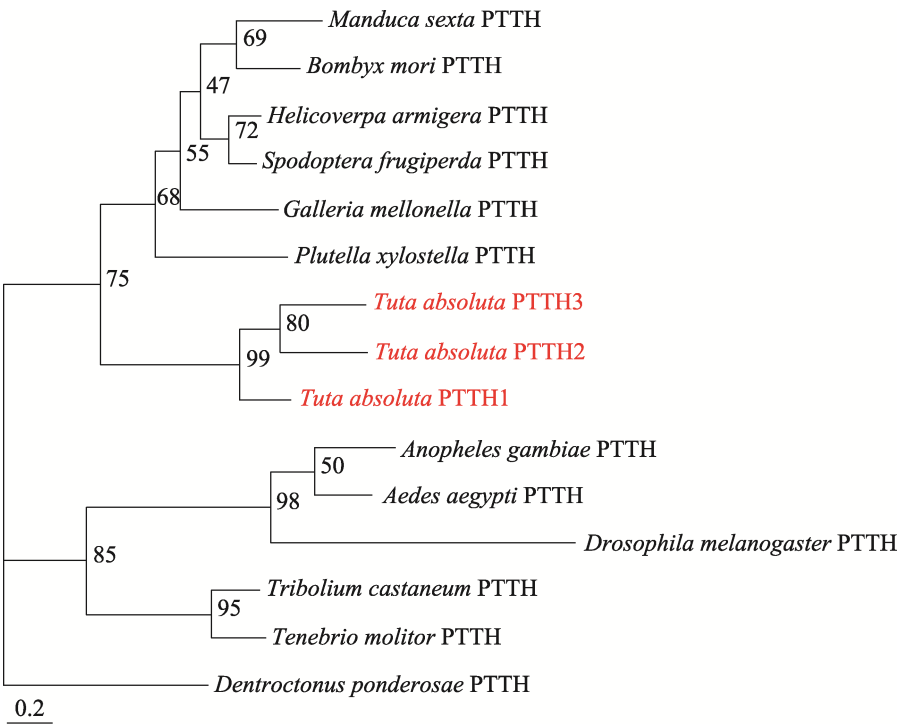

图 1　昆虫 PTTH 神经肽基因的系统发育分析

Fig. 1　Phylogenetic analysis of insect PTTH neuropeptide genes

图中进化树节点数字代表自展 5 000 次重复检验的百分比值，标尺下部的数字 0.2 指该长度的分支代表基因的遗传变异度为 0.2。

The number of nodes in the phylogenetic tree in the figure represents the percentage value using a bootstrap analysis of 5 000 replications, while the number 0.2 at the bottom of the scale bar indicates that the branch length represents a genetic divergence of 0.2.

所选生物物种包括 Selected biological species include: 烟草天蛾 *Manduca sexta*；家蚕 *Bombyx mori*；棉铃虫 *Helicoverpa armigera*；草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*；大蜡螟 *Galleria mellonella*；小菜蛾 *Plutella xylostella*；番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta*；冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae*；埃及伊蚊 *Aedes aegypti*；黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*；赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*；黄粉虫 *Tenebrio molitor*；中欧山松大小蠹 *Dendroctonus ponderosae*.

总而言之，番茄潜叶蛾的 PBAN 基因相比其他蛾类昆虫在基因结构和一些氨基酸保守位点上发生了变异。

2.4　番茄潜叶蛾性胰岛素样肽 ILPs 结构分析

在番茄潜叶蛾基因组中，鉴定出 8 个胰岛素样肽基因（表 1，图 3）。大多数 ILP 基因由信号肽、B 链、C 链和 A 链 4 个结构区域组成。其中，A 链和 B 链分别包含 4 和 2 个保守的半胱氨酸。A 链和 B 链通过链内和链间半胱氨酸之间形成的 3 个二硫键连接，构成具有功能的 ILP 神经肽，被切割下来的 C 链长度不一，通常不具有功能。番茄潜叶蛾 2 个 ILP 基因（Tabs000564.1 和 Tabs009817.1）的 C 链包含 1 个神经肽切割位点，将 C 链分成 2 个区域。ILP（Tabs015136.1）不包含 C 链，而是在 A 链之后连接一段较长的多肽序列。ILP（Tabs017372.1）在信号肽之后没有预测到神经肽切割位点，但仍然包含 A 链和 B 链的保守半胱氨酸位点。

2.5　番茄潜叶蛾性生殖素 NTL 基因分析

生殖素（Natalisin，NTL）基因在昆虫中广泛分布，系统发育分析表明相同目昆虫的 NTL 神经肽各自聚为一支，其中鳞翅目昆虫 NTL 基因包含的成熟神经肽数量高于其他目昆虫，C 端都具有保守的-PFWxxR 结构。番茄潜叶蛾 NTL 基因具有最多数量成熟肽，为 17 个（图 4）。

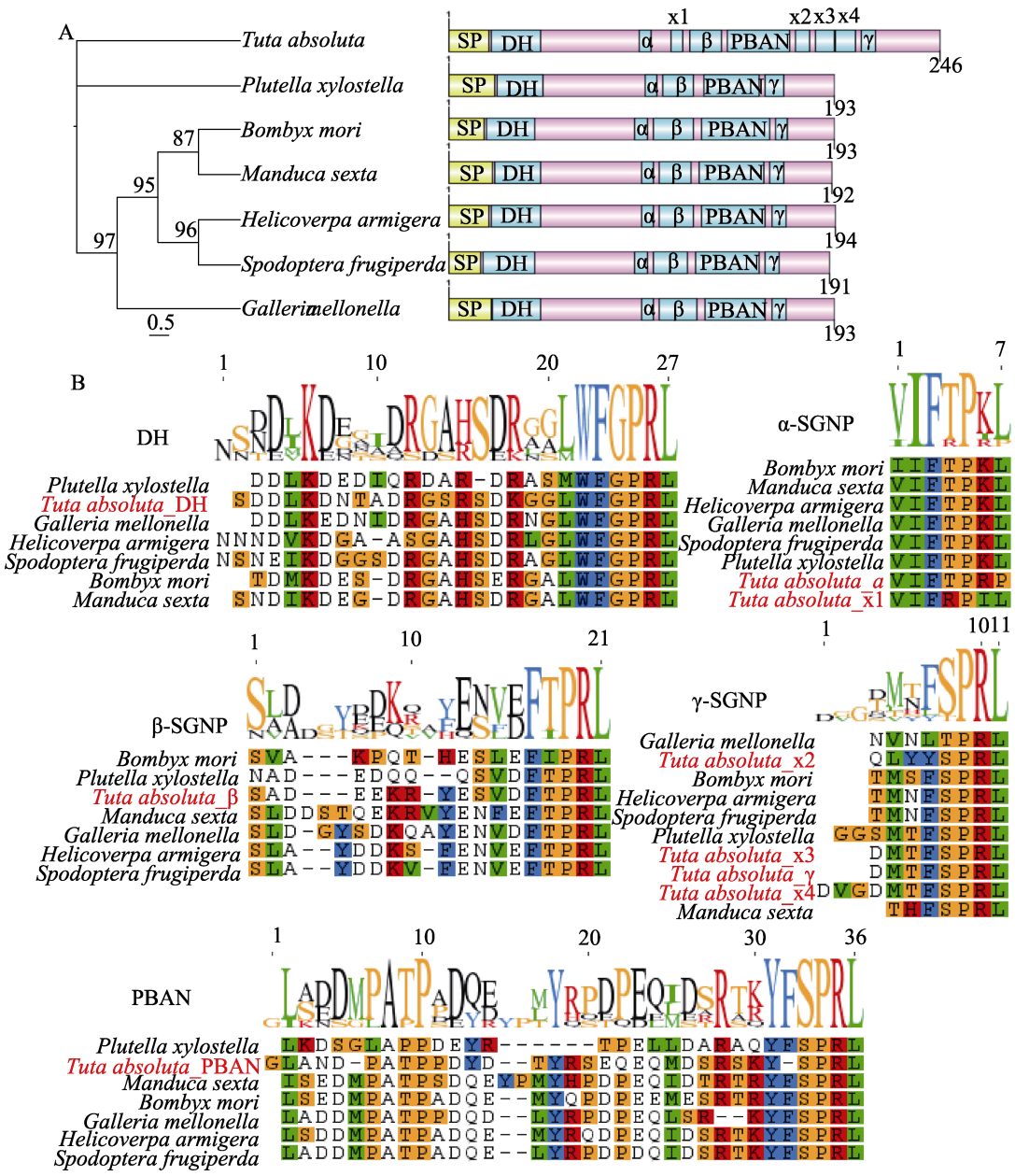

图 2　蛾类昆虫信息素合成激活肽（PBAN）基因系统发育（A）和基因序列结构（B）分析

Fig. 2　Phylogenetic analysis (A) and gene sequence structure analysis (B) of pheromone biosynthesis activating neuropeptide (PBAN) genes in moths

图中进化树节点数字代表自展 5 000 次重复检验的百分比值，标尺下部的数字 0.5 指该长度的分支代表基因的遗传变异度为 0.5；SP：信号肽；DH：滞育激素；PBAN：信息素合成激活肽；α、β、γ：α、β、γ-食道神经节神经肽；x1、x2、x3 和 x4：番茄潜叶蛾 PBAN 多切割的 4 个成熟肽。

The number of nodes in the phylogenetic tree in the figure represents the percentage value using a bootstrap analysis of 5 000 replications, while the number 0.5 at the bottom of the scale bar indicates that the branch length represents a genetic divergence of 0.5. SP: Signal peptide; DH: Diapause hormone; PBAN: Pheromone biosynthesis activating neuropeptide; α, β, γ: α-, β-, γ-subesophageal ganglion neuropeptides; x1, x2, x3 and x4: The four mature peptides of the PBAN multi-cleavage in *T. absoluta*.

所选生物物种包括 Selected biological species include: 番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta*；小菜蛾 *Plutella xylostella*；家蚕 *Bombyx mori*；烟草天蛾 *Manduca sexta*；棉铃虫 *Helicoverpa armigera*；草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*；大蜡螟 *Galleria mellonella*.

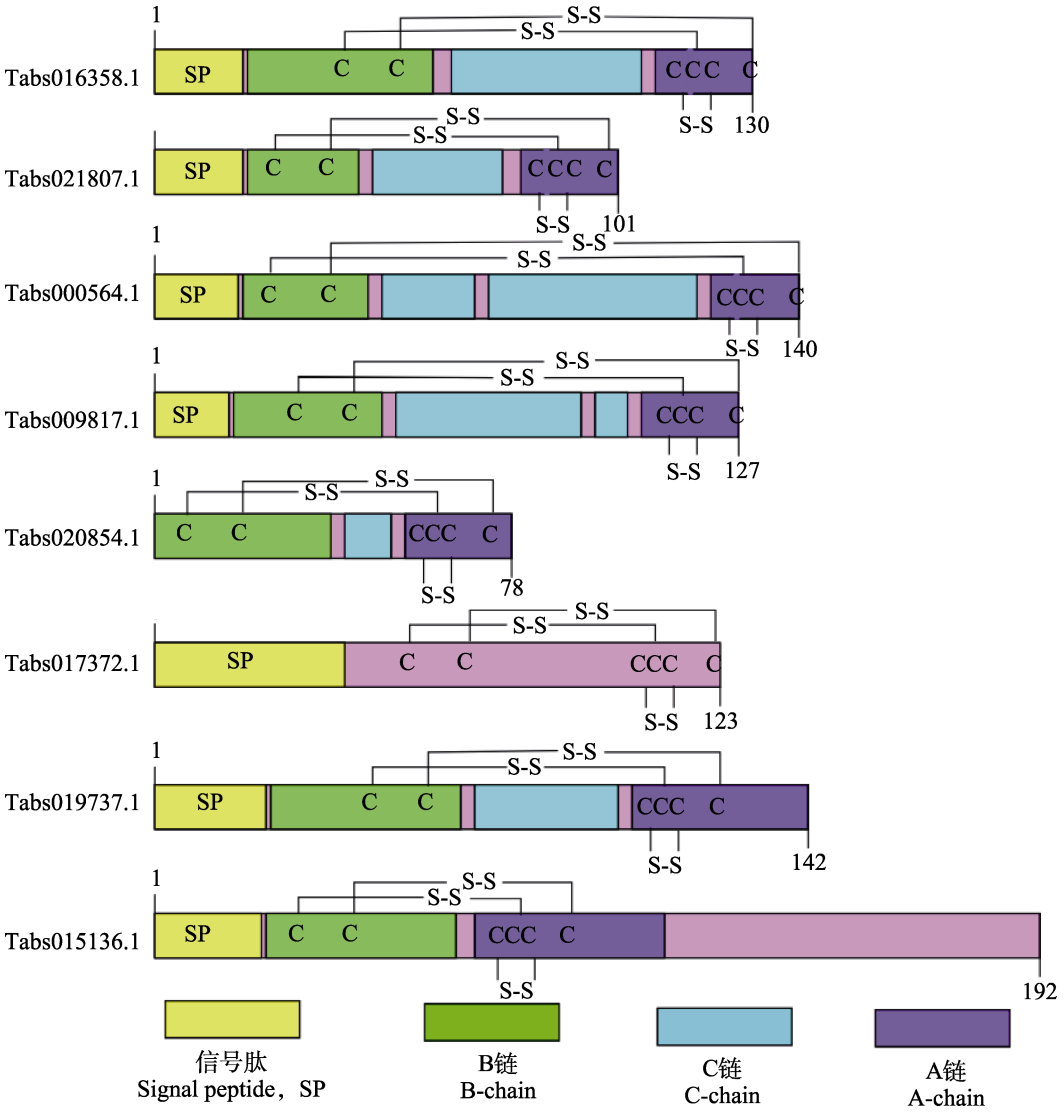

图 3　番茄潜叶蛾 8 个胰岛素样肽（ILP）基因结构分析

Fig. 3　Structural analysis of eight insulin-like peptide (ILP) genes in *Tuta absoluta*

预测的结构域包括：信号肽（SP）、B 链、C 链和 A 链，半胱氨酸连接的二硫键“S-S”展示在基因结构上。
The predicted domains include the signal peptide (SP), B-chain, C-chain, and A-chain, with disulfide bonds “S-S” between cysteines shown in the gene structure.

3　讨论

本研究在番茄潜叶蛾的基因组中共鉴定出 56 个神经肽基因，这一数量与其他鳞翅目昆虫相当，例如大蜡螟为 63 个（Luo *et al.*，2024）、草地贪夜蛾为 57 个（Shi *et al.*，2021），以及二化螟为 43 个（Xu *et al.*，2016）。这些神经肽基因的类别与其他鳞翅目昆虫一致，但在数量上存在差异。例如，脂肪动员激素（AKH）在其他鳞翅目昆虫中通常有 2 个或更多的转录本（如大蜡螟有 2 个、家蚕有 3 个，以及烟草天蛾 *Manduca sexta* 有 4 个）（Luo *et al.*，2024），而在番茄潜叶蛾基因组中仅发现 1 个转录本。利尿激素 DUH 家族神经肽在大蜡螟、家蚕、烟草天蛾和草地贪夜蛾中包含 DUH31、DUH34、DUH41 和 DUH45（Shi *et al.*，2021；Luo *et al.*，2024），但在番茄潜叶蛾基因组中仅发现 DUH31 和 DUH45 两个神经肽基因。胰岛素样肽 ILP 的数量在不同昆虫中差异较大，例如在家蚕中有 32 个以上的转录本（Mizoguchi and Okamoto，2013），在烟草天

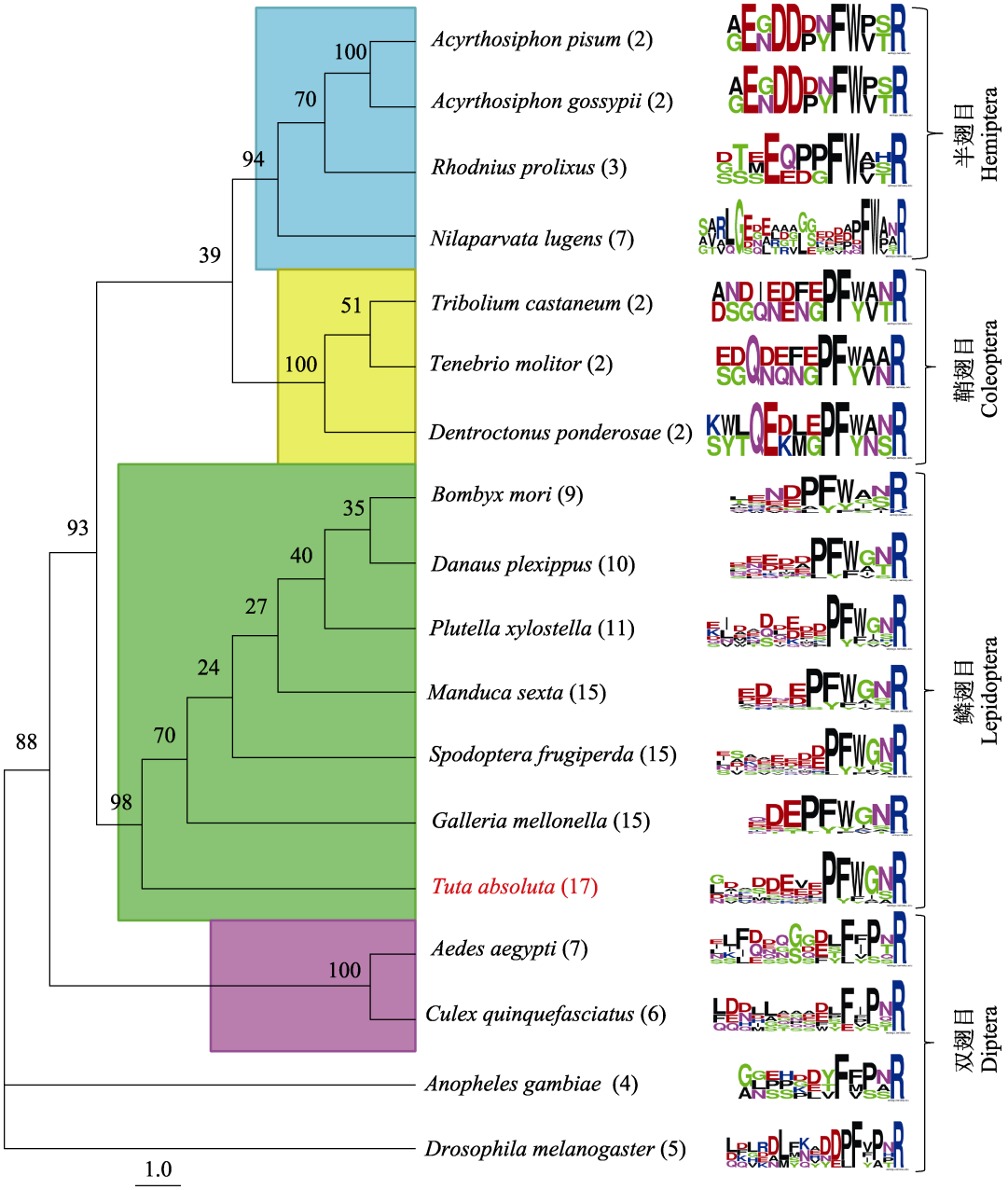

图 4　昆虫生殖素 NTL 基因系统发育分析

Fig. 4　Phylogenetic analysis of insect natalisin (NTL) genes

括号里的数字代表包含的成熟肽数量；图右侧展示了生殖素成熟肽 C 末端序列一致性分析；图中进化树节点数字代表自展 5 000 次重复检验的百分比值，标尺下部的数字 1.0 指该长度的分支代表基因的遗传变异度为 1.0。

The numbers in parentheses represent the number of mature peptides contained. The right side shows the consensus analysis of the C-terminal sequences of the mature natalisin peptides. The number of nodes in the phylogenetic tree in the figure represents the percentage value using a bootstrap analysis of 5 000 replications, while the number 1.0 at the bottom of the scale bar indicates that the branch length represents a genetic divergence of 1.0.

所选生物物种包括 Selected biological species include: 豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum*；棉长管蚜 *Acyrthosiphon gossypii*；长虹锥蝽 *Rhodnius prolixus*；褐飞虱 *Nilaparvata lugens*；赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*；黄粉虫 *Tenebrio molitor*；中欧山松大小蠹 *Dendroctonus ponderosae*；家蚕 *Bombyx mori*；黑脉金斑蝶 *Danaus plexippus*；小菜蛾 *Plutella xylostella*；烟草天蛾 *Manduca sexta*；草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*；大蜡螟 *Galleria mellonella*；番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta*；埃及伊蚊 *Aedes aegypti*；致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus*；冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae*；黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*.

蛾中有 18 个转录本（Nässel and Vanden Broeck，2016），而在番茄潜叶蛾中仅鉴定出 8 个转录本。离子转运肽 ITP、肌抑肽 MS 和 Trissin 神经肽在其他鳞翅目昆虫中通常有 2 个转录本（Luo *et al.*，2024），而在番茄潜叶蛾中仅发现 1 个转录本。一些神经肽如 ITP、TR 和 ILP 在转录过程中可能存在可变剪接，导致神经肽基因数量增加（Shi *et al.*，2021；Luo *et al.*，2024），因此番茄潜叶蛾实际的神经肽数量可能比基因组中分析到的更多，但本研究依然较为完整地描述了番茄潜叶蛾的神经肽基因。

此外，番茄潜叶蛾的一些神经肽基因相较于其他昆虫存在一定程度变异，例如促前胸腺激素（PTTH）在其他昆虫中通常只含有 1 个转录本（Luo *et al.*，2024），而在番茄潜叶蛾中扩张到了 3 个转录本。在昆虫中，PTTH 参与调控前胸腺蜕皮激素的合成，进而调控昆虫的变态过程（Gilbert *et al.*，2002）。PTTH 在前胸腺中通过结合 Torso 受体，启动信号转导，促进蜕皮激素的合成（Rewitz *et al.*，2009）。在鳞翅目昆虫中，PTTH 刺激的蜕皮激素生成可能涉及 2 条信号通路：MAPK 通路和 PI3K/Akt/TOR 通路（Scieuzo *et al.*，2018）。这种基因扩张可能为番茄潜叶蛾提供了更复杂的调控网络，以适应其特定的生态环境和生理需求。

信息素合成激活肽（PBAN）是一种广泛存在于鳞翅目昆虫中的重要神经肽（Rafaeli，2009），可切割生成 5 种成熟肽：滞育激素（DH）、信息素合成激活肽（PBAN）、以及 3 种食道下神经节神经肽（α-SGNP、β-SGNP 和 γ-SGNP）（周小草等，2020；Farris，2023），在多种生理功能中发挥作用，包括蛾类的性信息素合成、幼虫取食、幼虫滞育终止、胚胎滞育、蛹形成和蛹滞育解除等（Yamanaka *et al.*，2010；Dou and Jurenka，2023）。番茄潜叶蛾的 PBAN 神经肽前体蛋白序列存在独特变异，预测可以切割出 9 个成熟神经肽，除常规的 5 个成熟肽外，还包括 4 个新的成熟肽。新增的 4 个成熟肽与食道下神经节神经肽（SGNP）具有较高的序列相似性，这些 SGNP 在其他昆虫中参与调控取食行为和后肠功能。在家蚕中，这 5 种成熟肽均能在一定程度上促进性信息素的合成，其中 β-SGNP 的活性甚至高于 PBAN（杨惠和张金桐，2004）。这表明番茄潜叶蛾的 PBAN 可能具有更为独特的调控机制，参与更多生理功能的调控。

生殖素（NTL）最初在黑腹果蝇、赤拟谷盗和家蚕中被鉴定出来，分别包含 5、2 和 9 个成熟肽，并在雌雄虫中参与交配行为的调控（Jiang *et al.*，2013）。对 NTL 神经肽的序列分析表明，不同目昆虫中该神经肽各自聚为一支，并且在 C 端具有较为保守的 FWxxR 结构。值得注意的是，鳞翅目昆虫从 NTL 前体蛋白切割下来的成熟肽数量显著高于其他目昆虫（Shi *et al.*，2021），其中番茄潜叶蛾具有最多数量的成熟肽，达 17 个，这表明鳞翅目昆虫的 NTL 可能具有更复杂的调控信号通路。在斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 中，该神经肽在蛹期和成虫期具有较高的表达量，RNA 干扰其表达显著降低成虫的交配率和产卵量（Wang *et al.*，2021）。作为同属鳞翅目昆虫，番茄潜叶蛾的 NTL 可能具有相似的信号通路和调控机制。

胰岛素样肽（ILP）是一类多效性肽类激素，广泛存在于昆虫中，由多基因家族编码，并在大脑和其他组织中表达（Nässel and Vanden Broeck，2016）。这些肽类在分泌后可能作为激素、神经递质和生长因子发挥作用，参与调控代谢、生长、繁殖和寿命等过程（Wu and Brown，2006）。ILP 包含 B 链、C 链和 A 链，可以加工成由二硫键连接的 A 链和 B 链的二聚肽（Okamoto and Yamanaka，2015）。番茄潜叶蛾的 2 个 ILP 基因表现出不同寻常的特点。ILP（Tabs015136.1）不包含 C 链，而是在 A 链之后连接一段较长的多肽序列。根据预测的切割位点和二硫键连接，该神经肽仍可以加工成 A 链和 B 链的二聚肽。然而，ILP（Tabs017372.1）在信号肽之后没有预测到神经肽切割位点，但仍然包含 A 链和 B 链的保守半胱氨酸位点，表明 A 链和 B 链可能融合为一条链发挥功能。这些结果展示了 ILP 在结构和功能上的多样性。

综上所述，在番茄潜叶蛾的基因组中鉴定出

56 个神经肽基因，这些基因与其他鳞翅目昆虫类似，但在数量和序列上存在差异。例如，番茄潜叶蛾的促前胸腺激素（PTTH）基因扩张，以及信息素合成激活肽（PBAN）和胰岛素样肽（ILP）基因表现出不同寻常的结构变异，展示了其独特的基因组特征和调控机制。深入研究这些神经肽基因的表达和功能，有助于揭示其在昆虫生理中的角色，并为昆虫生态控制提供新思路（Van Hiel *et al.*，2010；Birgül *et al.*，2021）。未来，通过基因编辑和功能基因组学手段，解析神经肽在不同发育阶段和环境条件下的作用，将有助于开发更有效的生物防治技术，提升农业生产的可持续性。

参考文献 (References)

Biondi A, Guedes RNC, Wan FH, Desneux N, 2018. Ecology, worldwide spread, and management of the invasive South American tomato pinworm, *Tuta absoluta*: Past, present, and future. *Annual Review of Entomology*, 63: 239–258.

Birgül Iyison N, Shahraki A, Kahveci K, Düzgün MB, Gün G, 2021. Are insect GPCRs ideal next-generation pesticides: Opportunities and challenges. *FEBS Journal*, 288(8): 2727–2745.

Chen CJ, Wu Y, Li JW, Wang X, Zeng ZH, Xu J, Liu YL, Feng JT, Chen H, He YH, Xia R, 2023. TBtools-II: A “one for all, all for one” bioinformatics platform for biological big-data mining. *Molecular Plant*, 16(11): 1733–1742.

Dou XY, Jurenka R, 2023. Pheromone biosynthesis activating neuropeptide family in insects: A review. *Frontiers in Endocrinology* (*Lausanne*), 14: 1274750.

Farris SM, 2023. Insect PRXamides: Evolutionary divergence, novelty, and loss in a conserved neuropeptide system. *Journal of Insect Science*, 23(1): 3.

Gilbert LI, Rybczynski R, Warren JT, 2002. Control and biochemical nature of the ecdysteroidogenic pathway. *Annual Review of Entomology*, 47: 883–916.

Hummon AB, Richmond TA, Verleyen P, Baggerman G, Huybrechts J, Ewing MA, Vierstraete E, Rodriguez-Zas SL, Schoofs L, Robinson GE, Sweedler JV, 2006. From the genome to the proteome: Uncovering peptides in the *Apis* brain. *Science*, 314(5799): 647–649.

Jiang HB, Lkhagva A, Daubnerová I, Chae HS, Šimo L, Jung SH, Yoon YK, Lee NR, Seong JY, Žitňan D, Park Y, Kim YJ, 2013. Natalisin, a tachykinin-like signaling system, regulates sexual activity and fecundity in insects. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(37): E3526–E3534.

Kh SD, Keshan B, 2021. Larval feeding status regulates the transcript levels of genes encoding PTTH and allatoregulatory peptides in silkworm *Bombyx mori*. *Insect Science*, 28(3): 680–691.

Kim B, Kanai MI, Oh Y, Kyung M, Kim EK, Jang IH, Lee JH, Kim SG, Suh GSB, Lee WJ, 2021. Response of the microbiome-gut-brain axis in *Drosophila* to amino acid deficit. *Nature*, 593(7860): 570–574.

Li B, Predel R, Neupert S, Hauser F, Tanaka Y, Cazzamali G, Williamson M, Arakane Y, Verleyen P, Schoofs L, Schachtner J, Grimmelikhuijzen CJP, Park Y, 2008. Genomics, transcriptomics, and peptidomics of neuropeptides and protein hormones in the red flour beetle *Tribolium castaneum*. *Genome Research*, 18(1): 113–122.

Li FF, Zhao X, Zhu SY, Wang T, Li TF, Woolfley T, Tang GH, 2020. Identification and expression profiling of neuropeptides and neuropeptide receptor genes in *Atrijuglans hetaohei*. *Gene*, 743: 144605.

Li JJ, Shi Y, Lin GL, Yang CH, Liu TX, 2021. Genome-wide identification of neuropeptides and their receptor genes in *Bemisia tabaci* and their transcript accumulation change in response to temperature stresses. *Insect Science*, 28(1): 35–46.

Liu Y, Chen X, Yin YQ, Li XW, He K, Zhao XQ, Li XY, Luo XY, Mei Y, Wang ZQ, Shu RG, Cheng ZQ, Gebretsadik KG, Luo C, Wang R, Lv YB, Chen AD, Li F, 2023. A chromosome-level genome assembly of tomato pinworm, *Tuta absoluta*. *Scientific Data*, 10(1): 390.

Llopis-Giménez A, Han Y, Kim Y, Ros VID, Herrero S, 2019. Identification and expression analysis of the *Spodoptera exigua* neuropeptidome under different physiological conditions. *Insect Molecular Biology*, 28(2): 161–175.

Lu YY, 2021. Warning of the continued spread and invasion of the tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick), in China. *Journal of Environmental Entomology*, 43(2): 526–528. [陆永跃, 2021. 警惕番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick)在我国持续扩散入侵. 环境昆虫学报, 43(2): 526–528.]

Luo LL, Lin Y, Linghu JH, Gong W, Luo YH, Liu M, Jin DC, Smagghe G, Liu TX, Gui SH, Yi TC, 2024. Genomics, transcriptomics, and peptidomics of the greater wax moth *Galleria mellonella* neuropeptides and their expression in response to lead stress. *Insect Science*, 31(3): 773–791.

Mizoguchi A, Okamoto N, 2013. Insulin-like and IGF-like peptides in the silkmoth *Bombyx mori*: Discovery, structure, secretion,

and function. *Frontiers in Physiology*, 4: 217.

Nässel DR, 2002. Neuropeptides in the nervous system of *Drosophila* and other insects: Multiple roles as neuromodulators and neurohormones. *Progress in Neurobiology*, 68(1): 1–84.

Nässel DR, Vanden Broeck J, 2016. Insulin/IGF signaling in *Drosophila* and other insects: Factors that regulate production, release and post-release action of the insulin-like peptides. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 73(2): 271–290.

Nässel DR, Winther AME, 2010. *Drosophila* neuropeptides in regulation of physiology and behavior. *Progress in Neurobiology*, 92(1): 42–104.

Nässel DR, Zandawala M, 2019. Recent advances in neuropeptide signaling in *Drosophila*, from genes to physiology and behavior. *Progress in Neurobiology*, 179: 101607.

Okamoto N, Yamanaka N, 2015. Nutrition-dependent control of insect development by insulin-like peptides. *Current Opinion in Insect Science*, 11: 21–30.

Pandit AA, Ragionieri L, Marley R, Yeoh JGC, Inward DJG, Davies SA, Predel R, Dow JAT, 2018. Coordinated RNA-Seq and peptidomics identify neuropeptides and G-protein coupled receptors (GPCRs) in the large pine weevil *Hylobius abietis*, a major forestry pest. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 101: 94–107.

Qu CX, Tang LL, Yu ZY, 2021. Tomato leafminer damage and control. *Xibei Yuanyi* (*Comprehensive*), 11(6): 47–48. [屈春侠, 唐兰兰, 于忠友, 2021. 番茄潜叶蛾危害与防控. 西北园艺(综合), 11 (6): 47–48.]

Rafaeli A, 2009. Pheromone biosynthesis activating neuropeptide (PBAN): Regulatory role and mode of action. *General and Comparative Endocrinolog*, 162(1): 69–78.

Rewitz KF, Yamanaka N, Gilbert LI, O'Connor MB, 2009. The insect neuropeptide PTTH activates receptor tyrosine kinase torso to initiate metamorphosis. *Science*, 326(5958): 1403–1405.

Roller L, Yamanaka N, Watanabe K, Daubnerová I, Zitnan D, Kataoka H, Tanaka Y, 2008. The unique evolution of neuropeptide genes in the silkworm *Bombyx mori*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 38(12): 1147–1157.

Schoofs L, De Loof A, Van Hiel MB, 2017. Neuropeptides as regulators of behavior in insects. *Annual Review of Entomology*, 62: 35–52.

Scieuzo C, Nardiello M, Salvia R, Pezzi M, Chicca M, Leis M, Bufo SA, Vinson SB, Rao AS, Vogel H, Falabella P, 2018. Ecdysteroidogenesis and development in *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae): Focus on PTTH-stimulated pathways. *Journal of Insect Physiology*, 107: 57–67.

Shi Y, Li JJ, Li LY, Lin GL, Bilal AM, Smagghe G, Liu TX, 2021. Genomics, transcriptomics, and peptidomics of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera, Noctuidae) neuropeptides. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 106(1): e21740.

Van Hiel MB, Van Loy T, Poels J, Vandersmissen HP, Verlinden H, Badisco L, Vanden Broeck J, 2010. Neuropeptide receptors as possible targets for development of insect pest control agents. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 692: 211–226.

Veenstra JA, 2000. Mono- and dibasic proteolytic cleavage sites in insect neuroendocrine peptide precursors. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 43(2): 49–63.

Veenstra JA, 2014. The contribution of the genomes of a termite and a locust to our understanding of insect neuropeptides and neurohormones. *Frontiers in Physiology*, 5: 454.

Veenstra JA, 2019. Coleoptera genome and transcriptome sequences reveal numerous differences in neuropeptide signaling between species. *PeerJ*, 7: e7144.

Wang XF, Chen Z, Wang XB, Xu J, Chen P, Ye H, 2021. Bacterial-mediated RNAi and functional analysis of Natalisin in a moth. *Scientific Reports*, 11(1): 4662.

Wu Q, Brown MR, 2006. Signaling and function of insulin-like peptides in insects. *Annual Review of Entomology*, 51: 1–24.

Xu G, Gu GX, Teng ZW, Wu SF, Huang J, Song QS, Ye GY, Fang Q, 2016. Identification and expression profiles of neuropeptides and their G protein-coupled receptors in the rice stem borer *Chilo suppressalis*. *Scientific Reports*, 6: 28976.

Yamanaka N, Hua YJ, Roller L, Spalovská-Valachová I, Mizoguchi A, Kataoka H, Tanaka Y, 2010. *Bombyx* prothoracicostatic peptides activate the sex peptide receptor to regulate ecdysteroid biosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(5): 2060–2065.

Yang H, Zhang JT, 2004. Recent advances of insect PBAN family neuropeptides. *Acta Parasitologica and Medica Entomologica Sinica*, 11(2): 121–127. [杨惠, 张金桐, 2004. 昆虫 PBAN 家族神经肽研究进展. 寄生虫与医学昆虫学报, 11(2): 121–127.]

Yeoh JGC, Pandit AA, Zandawala M, Nässel DR, Davies SA, Dow JAT, 2017. DINeR: Database for insect neuropeptide research. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 86: 9–19.

Zhang GF, Liu WX, Wan FH, Xian XQ, Zhang YB, Guo JY, 2018. Bioecology, damage and management of the tomato leafminer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), a worldwide quarantine pest. *Journal of Biosafety*, 27(3): 155–163. [张桂芬, 刘万学, 万方浩, 冼晓青, 张毅波, 郭建洋, 2018. 世界毁灭性检疫害虫番茄潜叶蛾的生物生态学及危害与控制. 生物安

全学报, 27(3): 155–163.]

Zhang GF, Ma DY, Liu WX, Wang YS, Fu WJ, Wang J, Gao YH, Wan FH, 2019. The arrival of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), in China. *Journal of Biosafety*, 28(3): 200–203. [张桂芬, 马德英, 刘万学, 王玉生, 付文君, 王俊, 高有华, 万方浩, 2019. 中国新发现外来入侵害虫-南美番茄潜叶蛾(鳞翅目：麦蛾科). 生物安全学报, 28(3): 200–203.]

Zhang GF, Xian XQ, Zhang YB, Liu WX, Liu H, Feng XD, Ma DY, Wang YS, Gao YH, Zhang R, Li QH, Wan FH, Fu WJ, Wang J, Kuang M, Yang WJ, Rao X, Gao Y, Dai AM, 2021. Outbreak of the South American tomato leafminer, *Tuta absoluta*, in the Chinese mainland: Geographic and potential host range expansion. *Pest Management Science*, 77(12): 5475–5488.

Zhang H, Bai J, Huang SN, Liu HH, Lin JT, Hou YM, 2020. Neuropeptides and G-protein coupled receptors (GPCRs) in the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (Coleoptera: Dryophthoridae). *Frontiers in Physiology*, 11: 159.

Zhou XC, Luo M, Zhang JL, Wei HY, 2020. Advances in PBAN and PBANR cloning of moths. *Central China Insect Research*, 16: 162–174. [周小草, 罗妹, 张佳丽, 魏洪义, 2020. 蛾类昆虫 PBAN 和 PBANR 克隆的研究进展. 华中昆虫研究, 16: 162–174.]

****

封面介绍

中华雏蜂虻 *Anastoechus chinensis* Paramonov, 1930

体中型，粗壮多绒毛，外形似蜂。头部的毛以白色为主，额三角区被稀疏直立的黑色毛，颜被浓密直立的白色毛和稀疏直立的黑色毛，后头被浓密的白色长毛和稀疏直立的黑色长毛。触角黑色，短而粗。喙黑色，直长，长度约为头的 4 倍。胸部隆起，翅发达。胸部的毛为淡黄色和白色。小盾片黑色，被浓密直立的淡黄色毛。

本期封面照片是在第三次新疆综合科学考察过程中，于 2023 年 6 月 6 日拍摄于新疆阿勒泰地区林业科学研究所研学基地。科考中发现，该物种成虫正取食林荫鼠尾草 *Salvia nemorosa* 的花蜜。据报道，中华雏蜂虻的幼虫以取食蝗虫卵为生，是重要的天敌昆虫。

感谢李轩昆博士帮忙鉴定物种，感谢第三次新疆综合科考“阿尔泰山跨境保护地生物多样性考察”（2022xjkk0801）项目资助。

（姜春燕，中国科学院动物研究所）