

白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 OBP1 与寄主挥发物的分子对接研究

相伟芳^{1,2}, 李敏^{1,2}, 林艳平³, 王静³, 张新玥^{1,2}, 郭美琪¹, 杨艺新^{1,2}, 朱耿平^{1,2}, 潘丽娜^{1,2*}

¹天津师范大学生命科学学院, 天津 300387; ²天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387;

³漯河市豫中南林业有害生物天敌繁育研究中心, 河南 漯河 462300

摘要:【目的】白蛾周氏啮小蜂为重大入侵害虫美国白蛾的主要天敌。本课题组前期通过转录组测序技术筛选出 8 个主要在白蛾周氏啮小蜂雌性触角中表达的气味结合蛋白 OBPs。然而目前, 对这些 OBPs 的具体结构和功能仍不清楚。因此, 选取一个在雌性周氏啮小蜂触角特异表达的气味结合蛋白 OBP1, 通过分子对接技术模拟寄主挥发物与 OBP1 的结合情况。【方法】通过 Swiss-Model 对白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 进行同源建模, 获得该蛋白的三维结构。从 Pubchem 下载 γ -丁内酯、邻苯二甲酸二甲酯和萘等 11 种小分子的三维结构。用 Schrodinger Suites 2015-2 中的 maestro10.2 软件进行分子对接。【结果】在 11 种挥发物中, 有 3 种与 CcOBP1 结合特性较好的小分子物质, 分别是 γ -丁内酯、邻苯二甲酸二甲酯和萘。【结论】白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 与 γ -丁内酯、邻苯二甲酸二甲酯和萘结合特性较好, CcOBP1 的功能可能与白蛾周氏啮小蜂的趋避效应相关, 该结果初步探明了白蛾周氏啮小蜂 OBP1 的功能, 可为白蛾周氏啮小蜂嗅觉分子机制的研究积累数据。**关键词:** 白蛾周氏啮小蜂; 美国白蛾; 分子对接; 气味结合蛋白; 小分子化合物

Molecular docking of odorant binding protein1 of *Chouioia cunea* with host volatiles

XIANG Weifang^{1,2}, LI Min^{1,2}, LIN Yanping³, WANG Jing³, ZHANG Xinyue^{1,2}, GUO Meiqi¹, YANG Yixin^{1,2}, ZHU Gengping^{1,2}, PAN Lina^{1,2*}

¹College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; ²Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; ³Luohe Natural Enemy Research and Breeding Center of Forestry Pest, Luohe, Henan 462300, China

Abstract: 【Aim】 *Chouioia cunea* is the main natural enemy of the invasive pest *Hyphantria cunea*. Molecular expression analyses of different tissues and both sexes of this pest show that eight OBPs are exclusively or primarily expressed in female antennae. However, the specific structure and function of these OBPs are still unknown. In this study, CcOBP1, which mainly expressed in the antenna of female *C. cunea*, was selected to study its functions by molecular docking technique. 【Method】 The best suitable 3D model of the CcOBP1 was obtained by Swiss-Model. The 3D structure of 11 ligands such as γ -butyrolactone, dimethyl phthalate and naphthalene were downloaded from Pubchem. Molecular docking was done using maestro 10.2 software from Schrodinger suite 2015-2. 【Result】 Among the 11 kinds of volatiles of *H. cunea*, three small molecules could bind to OBP1: γ -butyrolactone, dimethyl phthalate, and naphthalene. 【Conclusion】 The Odorant binding proteins CcOBP1 has a good binding affinity with γ -butyrolactone, dimethyl phthalate and naphthalene, and the function of CcOBP1 may be related to the repellent effect of *C. cunea*. These results may contribute to the understanding the olfactory molecular mechanisms of *C. cunea*.

Key words: *Chouioia cunea*; *Hyphantria cunea*; molecular docking; odorant binding proteins; small molecule compounds

嗅觉是昆虫至关重要的感觉系统, 昆虫利用嗅觉系统辨别其偏好的气味成分, 继而引起特定的生理和行为反应, 如定位寄主、探求配偶、交配、产卵、躲避天敌等 (Webster & Cardé, 2016)。通过研究昆

收稿日期 (Received): 2018-04-20 接受日期 (Accepted): 2018-06-24

基金项目: 天津市自然科学基金青年基金资助项目 (17JCQNJC14900); 国家自然科学基金 (31702058)

作者简介: 相伟芳, 女, 硕士研究生。研究方向: 昆虫嗅觉分子机制。E-mail: 1475017828@qq.com

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: skypln@tjnu.edu.cn

虫嗅觉机制,将为调控昆虫行为、防控害虫侵袭、保护和利用有益昆虫奠定基础。近 30 年来,人们对昆虫嗅觉分子机制的有了相对深入的了解,主要过程可以概括为气味分子可以通过昆虫的嗅觉感器(sensillum)进入感器淋巴液中,与其中的气味结合蛋白(odorant binding proteins, OBPs)结合并将其传递给气味受体(odorant receptors, ORs)。气味受体在接受气味分子后引起机体产生一系列的嗅觉反应(Vogt & Riddiford, 1981)。由于 OBPs 对气味分子的选择具有相对的专一性,每一种 OBP 只能结合一定类别的气味分子,对气味分子起到初步的过滤作用,是昆虫嗅觉识别过程中非常关键的一步(Cui *et al.*, 2016; Leal, 2013)。因此,OBPs 与气味分子的结合特性是本领域的研究热点,而分子对接技术(molecular docking)是近年来被应用于研究 OBPs 功能的新兴技术(Li *et al.*, 2017)。

分子对接是根据 Fisher 于 1894 年提出的理论模型“锁—钥原理”(lock and key principle)来模拟小分子配体与大分子受体间相互作用的一种方法。配体与受体的作用是分子识别的过程,主要通过氢键作用、疏水作用及范德华力等结合。通过计算,可以预测两者间结合的亲和力和结合模式,从而可以筛选出与大分子受体结合的小分子配体(George *et al.*, 2014)。由于可以实现快速精准对接,很大程度上减少配体小分子的筛选数量及时间,提高筛选效率和准确性。目前,分子对接技术已经被应用于多个领域,如生物大分子的修饰和药物设计等(许先进和王存新,1989)。2010 年,分子对接技术开始应用于昆虫嗅觉机制领域(He *et al.*, 2010)。此后,该技术在此领域得到了广泛的应用,如 Zhang *et al.* (2018)对茶尺蠖 *Ectropis obliqua* Warren 气味结合蛋白 OBP2、Wang *et al.* (2017)对紫榆叶甲 *Ambrostoma quadriimpressum* Motsch 气味结合蛋白 AquaOBP4、Sun *et al.* (2017)对苜蓿盲蝽 *Adelphocoris lineolatus* (Goeze) 气味结合蛋白 OBP6 的结合特性均进行了研究。

美国白蛾 *Hyphantria cunea* (Drury) 是重大外来入侵害虫,属鳞翅目灯蛾科,是一种食性杂、繁殖量大、适应性强、传播途径广、危害严重的世界性检疫害虫(季荣等,2003; 杨忠岐和张永安,2007; 张向欣和王正军,2009)。1979 年首次在我国辽宁丹东发现,随后扩散至山东、陕西、河北、天津等地,对我国农林业造成了严重危害(黄顶成和张润志,2011; 杨

忠岐和张永安 2007)。杨忠岐(1989)在我国发现和筛选出了寄生美国白蛾的特优天敌——白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang。白蛾周氏啮小蜂属姬小蜂科啮小蜂属,寄生在美国白蛾的蛹中,对美国白蛾种群起到很好的控制作用(杨忠岐等,2005; 郑雅楠等,2012)。目前已经广泛应用于美国白蛾的防治中,并取得显著成效。

本课题组前期对美国白蛾蛹、虫粪和老熟幼虫所释放的挥发性化合物进行了测定,共检测出了 11 种物质(Zhu *et al.*, 2016); Zhao *et al.* (2016)通过转录组测序技术对雌雄白蛾周氏啮小蜂触角进行了测序,共测定出 25 个气味结合蛋白(odorant binding proteins, OBPs)、80 个气味受体(odorant receptors, ORs)、10 个离子受体(ionotropic receptors, IRs)、11 个化学感受蛋白(chemosensory proteins, CSPs)、1 个神经元膜蛋白(sensory neuron membrane proteins, SNMPs)和 17 个味觉受体(gustatory receptors, GRs); 王凤竹等(2017)、张新玥等(2018)通过实时荧光定量 PCR 检测及 RT-PCR 检测发现了一些主要在雌雄触角上大量表达的蛋白,推测这些蛋白的功能可能直接与寻找寄主相关,对白蛾周氏啮小蜂 *CcOBP1* 和非典型性气味受体 *CcOr83b* 基因进行了多角度的进化分析。本研究拟选取一个主要在雌性触角大量表达的蛋白 *CcOBP1*,通过分子对接技术,研究与 11 种寄主挥发物的结合特性,从而确定 *CcOBP1* 的功能,为白蛾周氏啮小蜂的嗅觉分子机制研究积累数据。

1 材料与方法

1.1 白蛾周氏啮小蜂 OBP1 同源建模及模型评价

根据已经得到的白蛾周氏啮小蜂 *CcOBP1* 全序列,通过 BioEdit 将序列转化成氨基酸序列作为建模模板,在 Swiss-Model (<http://swissmodel.expasy.org/>)对 *CcOBP1* 进行同源建模,获得该蛋白的三维结构。用 Ramachandran 图(Ramachandran *et al.*, 1963)评价 *CcOBP1* 蛋白三维结构的质量。

1.2 白蛾周氏啮小蜂 OBP1 蛋白的分子对接

前期对美国白蛾蛹、老熟幼虫及虫粪的挥发物进行了鉴定,一共得到了 11 种化合物(表 1)。将这 11 种化合物用于 *CcOBP1* 分子对接,从 Pubchem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>)下载这 11 种小分子的三维结构。用 Schrodinger Suites 2015-2 中的 maestro 10.2 软件进行分子对接:通过 maestro 10.2 软件导入已构建好的白蛾周氏啮小蜂 OBP1 的三维结

构,用 Discovery Studio 4.5 Visualizer 软件打开该三维结构,手动输入具体坐标,可进行适当调整,使白蛾周氏啮小蜂 OBP1 的活性中心位于盒子中心,生成文件保存;导入已经下载好的小分子物质结构,进行小分子其他构象的搜索,保存生成的文件;用 maestro 10.2 进行分子对接,PyMol v1.3 显示对接结果。

表 1 小分子物质的名称及 CAS 号
Table 1 Names and CAS numbers of small molecular substances

名称 Name	化学式 Chemical formula	CAS 号 CAS No.
萘 Naphthalene	C ₁₀ H ₈	91-20-3
γ-丁内酯 Gamma-Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂	96-48-0
癸醛 Decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	112-31-2
1-十二烯 1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄	112-41-4
邻苯二甲酸二甲酯 Dimethyl phthalate	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	131-11-3
十六烷 N-Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	544-76-3
正十四烷 N-Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	629-59-4
正十五烷 N-Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	629-62-9
十七烷 N-heptadecane	H ₃ (CH ₂) ₁₅ CH	629-78-7
1-癸烯 1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	872-05-9
七甲基壬烷	C ₁₆ H ₃₄	4390-4-9
2,2,4,4,6,8,8Heptamethyl-Nonan		

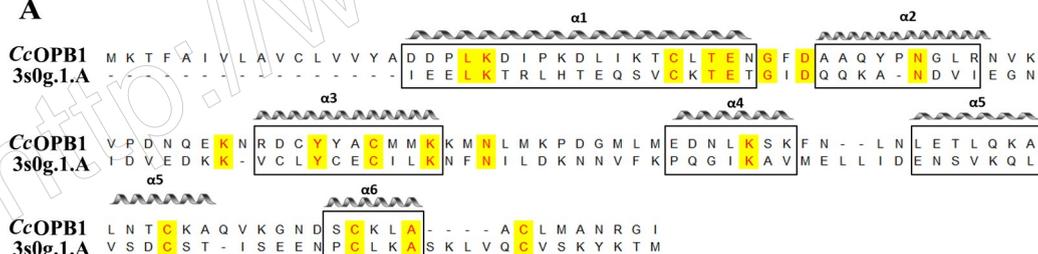
2 结果与分析

2.1 白蛾周氏啮小蜂 OBP1 同源建模分析

利用 Swiss-Model 在线搜索白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 最佳模型的模板,结果表明,意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 的气味结合蛋白 OBP14 (Spinelli *et al.*, 2012) (ID: 3s0g.1) 的相似度最高,因此将意大利蜜蜂的气味结合蛋白 OBP14 作为白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 的模板,通过 Swiss-Model 构建白蛾周氏啮小蜂 CcOBP1 结构模型(图 1)。白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 的三维结构包括 Pro20-Asn36(α1)、Ala4154-Arg48(α2)、Asp61-Lys70(α3)、Glu82-Lys88(α4)、Leu93-Ala105(α5)、Ser112-Ala116(α6),6个α螺旋结构。

拉式构象(ramachandran)图结果显示,90.6% CcOBP1 氨基酸残基落在最佳区域,8.5%的氨基酸残基落在较合理区域,只有 0.9%的氨基酸残基落在不允许区域(图 2)。有 90.6% CcOBP1 氨基酸残基落在最佳区域,大于 90%,说明这个蛋白模型较为合理,可以用于后续分子对接中。

A



B

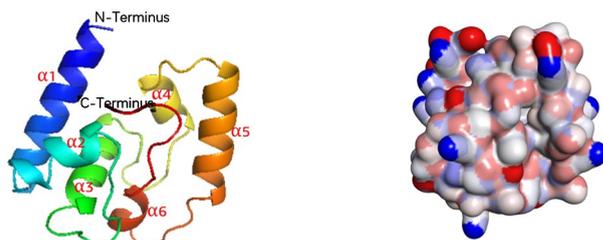


图 1 白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 Cc OBP1 结构图

Fig.1 3D structures of odorant binding protein1 of *C. cunea*

A: CcOBP1 与意大利蜜蜂的气味结合蛋白 OBP14 (ID: 3s0g.1) 的序列比对,完全相同的残基以红色字体、黄色背景突出;

B: 白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 三维结构图。

A: Sequence alignment of CcOBP1 with OBP14 from *A. mellifera* (PDB ID: 3S0g.1); α-helices are displayed as helix.

Strictly identical residues are highlighted in red letters with yellow background;

B: The 3D structures of CcOBP1.

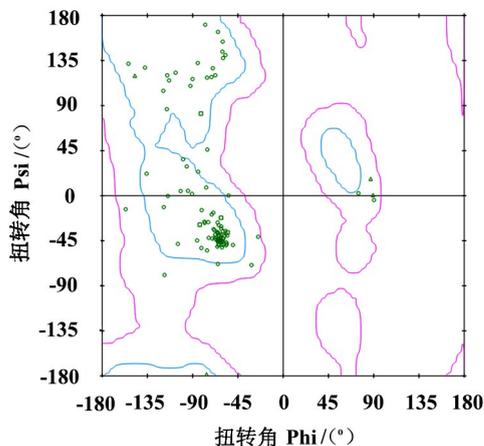


图 2 白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 Ramachandran 图

Fig.2 Rational evaluation of the established 3D model of CcOBP1 by Ramachandran plot

蓝色区域表示氨基酸残基位于最佳区域(90.6%)，紫色区域表示较合理区域(8.5%)，白色区域表示不允许区域(0.9%)。

The blue region indicates where the amino acid residues are in the favored regions (90.6%), the purple region indicates allowed regions (8.5%), and the white region indicates an outlier regions (0.9%).

2.2 白蛾周氏啮小蜂 OBP1 与美国白蛾蛹挥发物的分子对接

分子对接结果得到的白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 与化合物结合的结合常数代表两者结合所需的自由能,数值越小表明结合特性越强。根据分子对接结果共得到了 3 种可能与 CcOBP1 结合特性较强的小分子物质(表 2),白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 与 γ -丁内酯可通过分子间作用力形成稳定的结构(图 3A-C),主要通过范德华力和氢键进行结合;CcOBP1 的 Asn-122、Ala-121 与 γ -丁内酯通过氢键结合;Leu-119、Met-120、Arg-123、Leu-85、Ala-99 通过范德华力结合;Phe-89 通过碳磷键结合;Cys-118、Cys-103 通过碳碳键结合。

白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 与邻苯二甲酸二甲酯主要通过范德华力等作用力进行结合(图 3D-F)。CcOBP1 的 Met-68 通过磷硫键与邻苯二甲酸二甲酯结合;Leu-73、Leu-80、Leu-119、Ala-99、Ala-116、Ala-121、Met-67、Asn-122 通过范德华力与邻苯二甲酸二甲酯结合;Cys-118、Arg-123 与邻苯二甲酸二甲酯通过碳氢键结合;Leu-103、Tyr-64、Met-120、Phe-89 与邻苯二甲酸二甲酯通过碳碳键和碳磷键结合。

白蛾周氏啮小蜂气味结合蛋白 CcOBP1 与萘主要通过范德华力进行结合(图 3G-I)。CcOBP1 的 Ala-99、Ala-116、Ala-121、Leu-73、Leu-80、Leu-85、Leu-119、Lys-88、Asn-122、Arg-123 与萘主要通过范德华力进行结合;Met-67、Met-68、Met-120、Cys-108、Cys-118、Thy-64、Phe-89 通过碳碳键和碳磷键结合。

表 2 可能与白蛾周氏啮小蜂结合的化合物及结合常数

Table 2 Compounds and binding constants that may bind to CcOBP1

排名 Rank	化合物名称 Compound name	结合常数 Binding constant
1	γ -丁内酯 Gamma-Butyrolactone	-5.35023
2	邻苯二甲酸二甲酯 Dimethyl phthalate	-5.25727
3	萘 Naphthalene	-5.0768
4	七甲基壬烷 2,2,4,4,6,6,8,8-heptamethyl-Nonan	-3.65785
5	癸醛 Decanal	0.612211
6	十六烷 N-Hexadecane	1.07681
7	正十四烷 N-Etradecane	1.08579
8	正十五烷 N-Pentadecane	1.10273
9	十七烷 N-heptadecane	1.17311
10	1-十二烯 1-Dodecene	3.05666
11	1-癸烯 1-Decene	3.44924

3 讨论

气味结合蛋白(OBPs)和化学感受蛋白(CSP)被认为是昆虫化学感受中信息素和气味物质的载体。这些蛋白通常位于触角、口器和其他化学感觉结构中。这两类蛋白质的成员最近已经在昆虫身体的其他部分被检测到,并且被指出与各种功能有关。在某些情况下,相同的蛋白质在触角和信息素腺中表达,因此在接收和传播相同的化学信息方面发挥着双重作用(Pelosi *et al.*, 2017)。在昆虫触角特异表达的气味结合蛋白在很大程度上与昆虫行为有关。研究发现,在昆虫雄性触角特异表达的气味结合蛋白可能与性信息素的结合有关(巩中军等, 2005);在雌性昆虫触角特异表达的蛋白可能与寻找寄主和选择产卵地有关(张婷等, 2012; Zhang *et al.*, 2011)。CcOBP1 是白蛾周氏啮小蜂的气味结合蛋白,其在雌性白蛾周氏啮小蜂触角特异性表达。因此,推测 CcOBP1 可能会与白蛾周氏啮小蜂寄主所释放的挥发物结合,因为雌性白蛾周氏啮小蜂需要寻找合适的寄主产卵,因而需要有较强的感知能力去感知寄主所释放的挥发物。

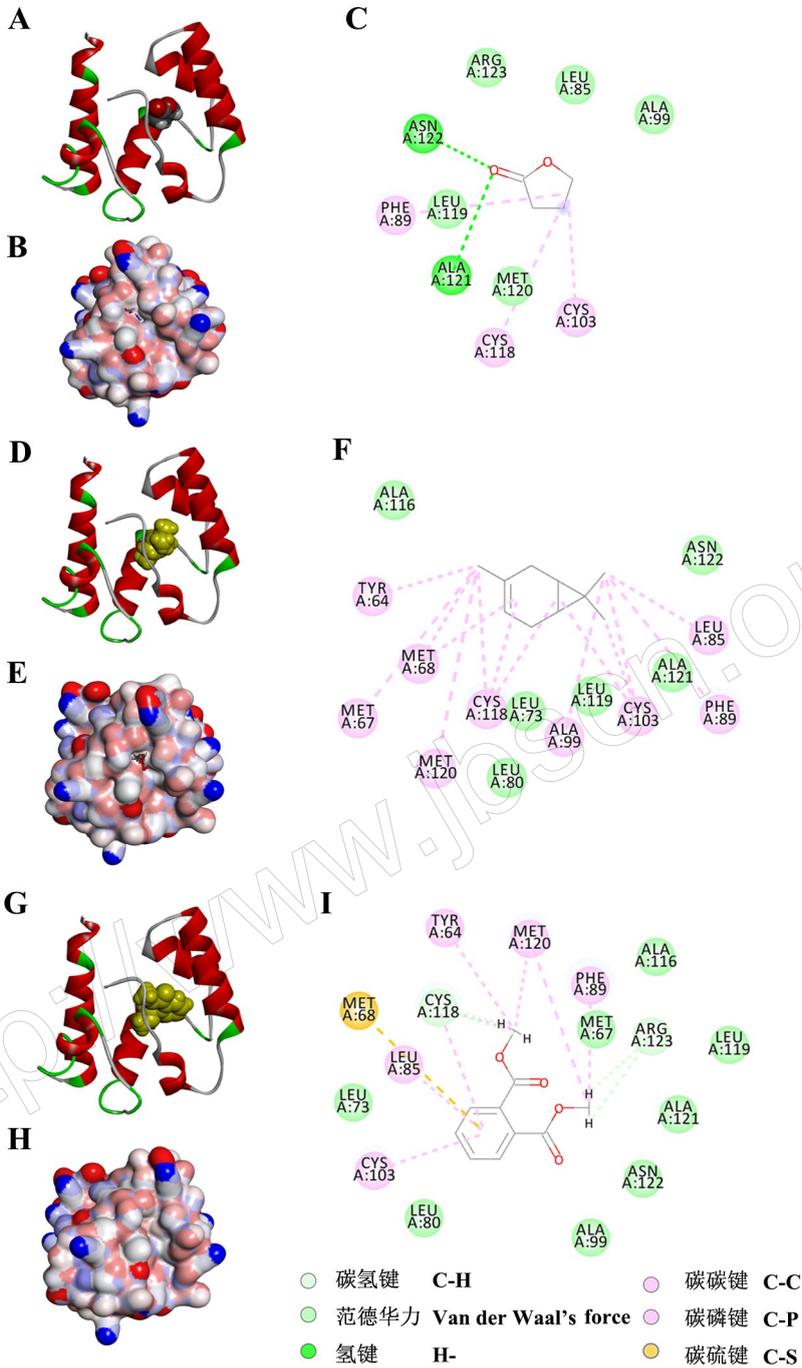


图3 CcOBP1 与小分子化合物对接结果

Fig.3 Result of that docking of CcOBP1 with small molecule compounds

A; CcOBP1 与 γ -丁内酯相互作用的全过程; B: 加了表面的 CcOBP1 与 γ -丁内酯作用过程; C: CcOBP1 与 γ -丁内酯详细的作用过程;
 D: CcOBP1 与邻苯二甲酸二甲酯相互作用的过程; E: 加了表面的 CcOBP1 与邻苯二甲酸二甲酯的作用过程; F: CcOBP1 与邻苯二甲酸二甲酯作用的详细过程; G: CcOBP1 与萘相互作用的全过程; H: 加了表面的 CcOBP1 与萘的作用过程;
 I: CcOBP1 与萘详细的作用过程。

A: The total appearance of CcOBP1 interacting with γ -butyrolactone; B: The reaction process of CcOBP1 with γ -butyrolactone added at the surface;
 C: The detailed reaction process between CcOBP1 and γ -butyrolactone; D: The total appearance of CcOBP1 interacting with dimethyl phthalate;
 E: The reaction process of CcOBP1 with dimethyl phthalate added; F: The detailed reaction process between CcOBP1 and dimethyl phthalate;
 G: The total appearance of CcOBP1 interacting with naphthalene; H: The reaction process of CcOBP1 with naphthalene added;
 I: The detailed reaction process between CcOBP1 and naphthalene.

本研究通过 Swiss-Model 建立了 OBP1 蛋白的同源模型,然后又与 11 种小分子物质进行了分子对接。对接结果表明,白蛾周氏啮小蜂 OBP1 可能与 γ -丁内酯、邻苯二甲酸二甲酯和萘结合。

本课题组前期对美国白蛾蛹挥发物中的若干化合物进行了生物活性测定 (Zhu *et al.*, 2016)。触角电位结果表明, γ -丁内酯、邻苯二甲酸和萘都能引起白蛾周氏啮小蜂触角较明显的电位反应。基于 Y 型嗅觉仪结果显示, γ -丁内酯、邻苯二甲酸二甲酯和萘均对白蛾周氏啮小蜂具有明显的趋避作用。 γ -丁内酯已经在其他的研究中被鉴定为植物挥发物 (Moon & Shibamoto, 2009; Selli *et al.*, 2008),但 γ -丁内酯在昆虫体内的作用尚无研究。邻苯二甲酸二甲酯经鉴定为植物挥发物 (丁嘉文等, 2015),且其对按蚊等昆虫具有较好的趋避作用,可以作为蚊虫的趋避剂 (Karunamoorthi & Sabesan, 2010; Vatandoos *et al.*, 2008)。萘对赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* Herbst 等昆虫的生长发育有很大的影响,高浓度的萘可以使其致死 (Pajarocastro *et al.*, 2017),对白蚁等昆虫具有趋避作用 (Aihetasham *et al.*, 2017)。

本研究结果表明,白蛾周氏啮小蜂 *CcOBP1* 与 γ -丁内酯、邻苯二甲酸二甲酯和萘的结合特性较好,*CcOBP1* 的功能可能与白蛾周氏啮小蜂的趋避效应相关。在白蛾周氏啮小蜂寻找寄主的过程中,寄主对白蛾周氏啮小蜂既有引诱作用又有趋避作用,二者是协同作用的。因此,白蛾周氏啮小蜂与寻找寄主相关的 OBPs 的功能既有趋避作用也有趋向作用。本研究结果表明,*CcOBP1* 的功能为趋避作用,会对美国白蛾蛹中的一些挥发物产生趋避反应,这也是寄主与寄生性天敌协同进化的结果。但这一结果还需要进一步的验证,未来将通过荧光竞争结合实验进一步证明。

参考文献

丁嘉文,陈易彤,谢晓,朱庚平,刘向明,刘强, 2015. 四种不同方法提取沙枣花挥发物的成分分析. *植物科学学报*, 33(1): 116-125.

巩中军,原国辉,郭线茹,安世恒, 2005. 烟实夜蛾触角普通气味结合蛋白 II cDNA 的克隆、序列分析及在大肠杆菌中的表达. *昆虫学报*, 48(1): 18-23.

黄顶成,张润志, 2011. 中国外来入侵种的类群、原产地及

变化趋势. *生物安全学报*, 20(2): 113-118.

季荣,谢宝瑜,李欣海,高增祥,李典谟, 2003. 外来入侵种——美国白蛾的研究进展. *应用昆虫学报*, 40(1): 13-18.

王凤竹,张新玥,范伟健,赵燕妮,朱庚平,李敏, 2017. 周氏啮小蜂气味结合蛋白 I 基因的进化分析. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 37(1): 46-50.

许先进,王存新, 1989. 分子对接方法在药物发现之外领域的应用. *北京工业大学学报*, 43(12): 1872-1880.

杨忠岐, 1989. 中国寄生于美国白蛾的啮小蜂—新属—新种(膜翅目,姬小蜂科,啮小蜂亚科). *昆虫分类学报*, (Z1): 117-130.

杨忠岐,王小艺,王传珍,乔秀荣,庞建军, 2005. 白蛾周氏啮小蜂可持续控制美国白蛾的研究. *林业科学*, 41(5): 72-80.

杨忠岐,张永安, 2007. 重大外来入侵害虫——美国白蛾生物防治技术研究. *应用昆虫学报*, 44(4): 465-471.

张向欣,王正军, 2009. 外来入侵种美国白蛾的研究进展. *安徽农业科学*, 37(1): 215-219.

张新玥,王凤竹,范伟健,潘丽娜,朱庚平,林艳平,王静,李敏, 2018. 白蛾周氏啮小蜂普通气味受体 OR1 的进化分析. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 38(2): 29-34.

张婷,刘乃勇,董双林, 2012. 甜菜夜蛾触角结合蛋白 II 的 cDNA 克隆、组织分布及配体结合特性分析. *昆虫学报*, 55(5): 499-509.

郑雅楠,祁金玉,孙守慧,杨长成, 2012. 白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 的研究和生物防治应用进展. *中国生物防治学报*, 28(2): 275-281.

AIHETASHAM A, AKHTAR M S, UMER M, RASIB K Z, DIN M I, 2017. Bioactivity of extracts of foeniculum vulgare and ocimum basilicum against *Heterotermes indicola* (Wasmann). *Pakistan Journal of Zoology*, 49(6): 2193-2199.

CUI H H, GU S H, ZHU X Q, WEI Y, LIU H W, KHALID H D, GUO Y Y, ZHANG Y J, 2016. Odorant-binding and chemosensory proteins identified in the antennal transcriptome of *Adelphocoris suturalis* Jakovlev. *Comparative Biochemistry & Physiology Part D Genomics & Proteomics*, 24: 139-145.

GEORGE P D C, CHAKRABORTY C, NARAYAN V, THIRUMAL K D, 2014. Computational approaches and resources in single amino acid substitutions analysis toward clinical research. *Advances in Protein Chemistry & Structural Biology*, 94: 365-423.

HE X L, TZOTZOS G, WOODCOCK C, PICKETT J A, HOOPER T, FIELD L M, ZHOU J J, 2010. Binding of the general odorant binding protein of *Bombyx mori* BmorGOBP2 to the moth sex pheromone components. *Journal of*

Chemical Ecology, 36(12): 1293.

- KARUNAMOORTHY K, SABESAN S, 2010. Laboratory evaluation of dimethyl phthalate treated wristbands against three predominant mosquito (Diptera: Culicidae) vectors of disease. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 14(5): 443-448.
- LEAL W S, 2013. Odorant reception in insects: roles of receptors, binding proteins, and degrading enzymes. *Annual Review of Entomology*, 58(1): 373-391.
- LI H L, ZHAO L, FU X B, SONG X M, WU F, TANG M Z, CUI H C, YU J Z, 2017. Physicochemical evidences on the sublethal neonicotinoid imidacloprid interacting with an odorant-binding protein from the tea geometrid moth, *Ectropis obliqua*. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 65(16): 3276.
- MOON J K, SHIBAMOTO T, 2009. Role of roasting conditions in the profile of volatile flavor chemicals formed from coffee beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(13): 5823-5831.
- PAJAROCASTRO N, CABALLEROGALLARDO K, OLIVEROVERBEL J, 2017. Toxicity of naphthalene and benzene on *Tribolium castaneum* Herbst. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(6): 667-677.
- PELOSI P, IOVINELLA I, ZHU J, WANG G R, 2017. Beyond chemoreception: diverse tasks of soluble olfactory proteins in insects. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 93(1): 184-200.
- RAMACHANDRAN G N, RAMAKRISHNAN C, SASISEKHARAN V, 1963. Stereochemistry of polypeptide chain configurations. *Journal of Molecular Biology*, 7(1): 95-99.
- SELLI S, CANBAS A, VARLET V, KELEBEK H, PROST C, SEROT T, 2008. Characterization of the most odor-active volatiles of orange wine made from a Turkish cv. Kozan (*Citrus sinensis* L. osbeck). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(1): 227-234.
- SPINELLI S, LAGARDE A, LOVINELLA I, LEGRAND P, TEGONI M, PELOSI P, CABBILLAU C, 2012. Crystal structure of *Apis mellifera*, OBP14, a C-minus odorant-binding protein, and its complexes with odorant molecules. *Insect Biochemistry & Molecular Biology*, 42(1): 41-50.
- SUN L, WANG Q, YANG S, WANG Q, ZHANG Z, KHASHAVEH A, ZHANG Y J, GUO Y Y, 2017. Functional analysis of female-biased odorant binding protein 6 for volatile and nonvolatile host compounds in *Adelphocoris lineolatus* (Goeze). *Insect Molecular Biology*, 26(5): 601-615.
- VTAANDOOS H, KHAZANI A, RAFINEJAD J, KHOOBDEL M, KEBRIAI-ZADEH A, ABAI M R, BOJD A A H, AKHAVAN A A, ABTAHI S M, RAFI F, 2008. Comparative efficacy of neem and dimethyl phthalate (DMP) against malaria vector, *Anopheles stephensi* (diptera: culicidae). *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine* (3): 5-10.
- VOGT R G, RIDDIFORD L M, 1981. Pheromone binding and inactivation by moth antennae. *Nature*, 293: 161-163.
- WANG Y L, JIN Y C, CHEN Q, WEN M, ZHAO H B, DUAN H X, REN B Z, 2017. Selectivity and ligand-based molecular modeling of an odorant-binding protein from the leaf beetle *Ambrostoma quadriimpressum* (Coleoptera: Chrysomelidae) in relation to habitat-related volatiles. *Scientific Reports*, 7: 15374-15388.
- WEBSTER B, CARDÉ R T, 2016. Use of habitat odour by host-seeking insects. *Biological Reviews*, 92(2): 1241-1249.
- ZHANG Y L, FU X B, CUI H C, ZHAO L, YU J Z, LI H L, 2018. Functional characteristics, electrophysiological and antennal immunolocalization of general odorant-binding protein 2 in tea geometrid, *Ectropis obliqua*. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3): 875.
- ZHANG T T, GU S H, WU K M, ZHANG Y J, GUO Y Y, 2011. Construction and analysis of cDNA libraries from the antennae of male and female cotton bollworms *Helicoverpa armigera* (Hübner) and expression analysis of putative odorant-binding protein genes. *Biochemical & Biophysical Research Communications*, 407(2): 393-399.
- ZHAO Y N, WANG F Z, ZHONG X Y, ZHANG S H, GUO S L, ZHU G P, LIU Q, LI M, 2016. Transcriptome and expression patterns of chemosensory genes in Antennae of the parasitoid wasp *Chouioia cunea*. *PLoS ONE*, 11(2): e0148159.
- ZHU G P, PAN L N, ZHAO Y N, ZHANG X Y, WANG F Z, YU Y, FAN W, LIU Q, ZHANG S, LI M, 2016. Chemical investigations of volatile kairomones produced by *Hyphantria cunea* (Drury), a host of the parasitoid *Chouioia cunea* Yang. *Bulletin of Entomological Research*, 107(2): 234-240.

(责任编辑:郭莹)