

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.02.021

# 天牛科昆虫信息化合物研究现状

朱映<sup>1</sup>, 黄志嘉<sup>1</sup>, 蓝来娇<sup>1</sup>, 张锦坤<sup>1</sup>, 高庆远<sup>1</sup>, 王琳<sup>2</sup>,  
李拥虎<sup>2</sup>, 温秀军<sup>1\*</sup>, 马涛<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学, 林学与风景园林学院, 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 广州 510642;

2. 北京中捷四方生物科技股份有限公司, 北京 101102)

**摘要:**天牛科昆虫是危害严重的林业害虫, 给林业生产造成重大损失。昆虫信息化合物的鉴定及应用, 在害虫综合治理(IPM)中发挥着重要的作用。到目前为止, 已从100多种天牛科物种中鉴定出信息化物质, 天牛亚科(Cerambycinae)、沟胫天牛亚科(Lamiinae)和椎天牛亚科(Spondylidinae)鉴定出雄性天牛的聚集信息素组分, 花天牛亚科(Lepturinae)和锯天牛亚科(Prioninae)物种主要是鉴定出雌性天牛释放性的性信息素组分。这些信息素组分在不同亚科、不同属和种之间重叠率高, 同一种组分可以在多种天牛物种中发挥作用, 调节昆虫行为活动的信息化学物质在害虫治理中具有应用潜力和广阔的前景。对国内外已研究的天牛科信息素组分进行系统分析, 可为今后鉴定新的天牛科信息素组分提供依据, 加快我国天牛科信息素组分鉴定和应用进程。

**关键词:**天牛科; 信息素组分; 害虫综合治理

**中图分类号:**S763.38

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-1498(2020)02-0168-13

天牛科(Cerambycidae), 隶属鞘翅目, 目前全世界确定有35 000种, 中国纪录有约2 700种, 估计将超过3 000种<sup>[1-2]</sup>。天牛科昆虫作为一类重要的林业钻蛀性害虫, 以幼虫蛀干危害为主, 蛀食树木边材或心材, 造成树势衰弱, 严重时导致树木死亡; 成虫蛀食嫩枝和树干, 传播病原物, 对林木造成很大危害, 严重损害了森林生态系统的经济和生态效益<sup>[3-10]</sup>。天牛科幼虫通常寿命很长, 可隐藏于木制品和运输材料中, 通过全球贸易输入或输出, 在全球范围内传播, 因此, 天牛科昆虫在林业上是最常见的检疫对象<sup>[11-14]</sup>。其中有些种类如松褐天牛(*Monochamus alternatus*)、光肩星天牛(*Anoplophora glabripennis*)等都是重要的检疫性害虫, 尤其是松褐天牛, 除直接为害松树外, 还传播松材线虫

(*Bursaphelenchus xylophilus*), 引起松林大片枯死, 给我国林业生产和生态环境带来巨大的危害<sup>[15]</sup>。

近年来, 鳞翅目昆虫化学生态学研究领域不断取得重大进展, 但是关于鞘翅目昆虫的化学生态学研究较为缓慢, 2004年之前, 仅仅鉴定了10种左右的天牛信息素组分<sup>[5]</sup>。但是之后的十几年, 随着昆虫化学生态学逐渐被重视, 许多科学家开始参与到天牛信息素的研究, 目前, 已经从超过100种天牛物种中鉴定出信息素或可能的信息素, 各个种间信息素的比例和组分都不尽相同<sup>[16]</sup>。目前, 天牛信息素的研究主要集中在性信息素、接触信息素、聚集信息素等方面<sup>[17]</sup>。

信息化合物对害虫综合防治及农林生产具有重要影响<sup>[18-19]</sup>。天牛科昆虫信息素介导的通信可能代

收稿日期: 2019-03-20 修回日期: 2019-09-29

基金项目: 广东省林业科技创新项目(2019KJCX016), 校级大学生创新创业训练计划项目(201910564404)

\* 通讯作者: 温秀军(1965-), 男, 博士, 主要研究方向: 森林昆虫学、城市昆虫学、昆虫化学生态方面的研究, E-mail: wenxiujun@scau.edu.cn; 马涛(1987-), 男, 博士, 主要研究方向: 昆虫信息化合物控制技术天然活性产物的研究, E-mail: matao@scau.edu.cn

表了最古老的通信模式,天牛通过味觉和嗅觉感知信息素释放的信号以获得有关其生物和非生物环境的信息,因此,信息素在天牛科的生活史中至关重要<sup>[5]</sup>。天牛信息素中的某些组分可以调控其行为活动,如天牛成虫可被某些信息化合物吸引,所以人们常利用这些化合物作为诱饵来诱捕天牛。本文综述了天牛科昆虫信息化合物的研究概况以及信息化合物对天牛科昆虫的应用防控,力求为进一步深入研究提供参考。

## 1 天牛科信息化合物鉴定概况

目前全球鉴定的天牛科昆虫信息素组分主要包含10亚科200属406种。其中,以沟胫天牛亚科(Lamiinae)、天牛亚科(Cerambycinae)、锯天牛亚科(Prioninae)研究最为广泛(表1)。

## 2 天牛科昆虫信息素组分研究

天牛科昆虫的信息素类型有挥发性信息素和非挥发性信息素。挥发性信息素有两种类型:聚集信息素<sup>[20]</sup>,由雄虫产生并吸引两性,其作用距离较长;性信息素,由雌虫产生的仅吸引雄虫<sup>[16]</sup>,其作

用距离较短。已有的研究表明,天牛亚科(Cerambycinae),沟胫天牛亚科(Lamiinae)和椎天牛亚科(Spondylidinae)3个亚科的物种产生聚集信息素组分,锯天牛亚科和花天牛亚科两个亚科的物种产生性信息素组分。一般来说,不同类型信息素化学组分会明显不同,但不同属或不同亚科物种的同种类型信息素存在相同或相似的信息素组分。非挥发性信息素主要是雌虫体壁的接触性信息素成分,其主要是由高分子甲基支链烷烃或者烯烃构成,作为雌雄天牛生殖交配识别的化学信号<sup>[34]</sup>。还有一类天牛雌雄成虫均不分泌挥发性信息素,寄主挥发性成分对其种群聚集具有重要作用,成虫可通过寄主挥发信息素来定位宿主植物并以宿主为食,有些挥发信息素能被天牛成虫表皮角质层吸引,角质层吸收挥发信息素的天牛也可继续吸引配偶,因此,寄主挥发性信息素直接或间接介导天牛雌雄成虫的交配行为<sup>[35-37]</sup>。

### 2.1 天牛科昆虫雄性聚集信息素组分研究

迄今为止,天牛科天牛亚科(Cerambycinae),沟胫天牛亚科(Lamiinae)和椎天牛亚科(Spondylidinae)3个亚科中的所有物种,其挥发

表1 天牛科昆虫信息素的鉴定情况

Table 1 Identification of pheromones of Cerambycidae insects

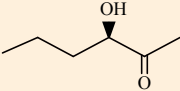
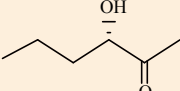
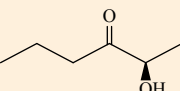
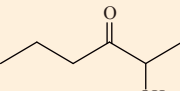

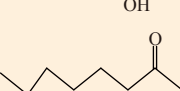
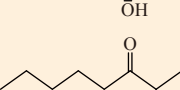
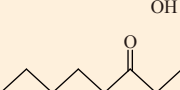

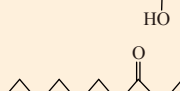


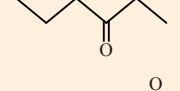
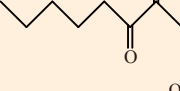
亚科 Subfamily	属/个 Genus	种/个 Species	信息素组分/种 Pheromone component	代表种 Representative species	参考文献 Reference
沟胫天牛亚科Lamiinae	64	122	101	<i>Anoplophora chinensi</i> 星天牛 <i>Monochamus alternatus</i> 松褐天牛	[20] [21]
天牛亚科Cerambycinae	82	165	168	<i>Hylotrupes bajulus</i> 北美家天牛 <i>Xylotrechus quadripes</i> 咖啡灭字脊虎天牛	[23]
花天牛亚科Lepturinae	34	69	85	<i>Ortholeptura valida</i>	[24]
椎天牛亚科Spondylidinae	4	20	47	<i>Tetropium fuscum</i> 暗褐断眼天牛 <i>Tetropium castaneum</i> 光胸断眼天牛	[25] [26]
锯天牛亚科Prioninae	9	22	23	<i>Megopsis costipennis</i> 脊薄翅天牛	[27]
瘦天牛亚科Disteniinae	1	1	3	<i>Distenia undata</i>	[28]
Anoplodermatinae	1	1	2	<i>Migdolus fryanus</i>	[29]
Parandrinae	1	1	1	褐异天牛 <i>Neandra brunnea</i>	[30]
Necydalinae	1	2	10	<i>Necydalis pennata</i>	[31]
未知	1	1	2	<i>Stenocentrus ostricilla</i>	[32]
未知	1	1	1	<i>Syllitus grammicus</i>	[32]
Vesperinae	1	1	1	<i>Vesperus xatarti</i>	[33]
总计	200	406	444		

注:信息素组分总计数包括各个亚科之间的相同组分重叠数;属和种是该亚科内已鉴定出信息素组分或是能被某些组分合成的信息化合物吸引的属和种数目。

Note: The total count of pheromone components includes the number of overlaps of the same components among subfamilies; genera and species are the number of genera and species that have been identified as pheromone components in this subfamily or can be attracted by the compounds synthesized by certain components.

表2 天牛科昆虫雄性信息素成分及来源

Table 2 Pheromones components and sources produced by males of Cerambycidae

化合物名称 Chemical Name	化学结构 Structure	物种 Species	参考文献 Reference
(R)-3-羟基-2-己酮 (R)-3-hydroxy-2-hexanone		<i>Anaglyptus subfasciatus</i> 柳杉纹虎天牛 <i>Plagionotus detritus</i> ssp 截尾丽虎天牛等	[62] [42]
(S)-3-羟基-2-己酮 (S)-3-hydroxy-2-hexanone		<i>Xylotrechus colonus</i> 宽斑脊虎天牛 <i>Xylotrechus nauticus</i> <i>Callidiellum rufipenne</i>	[30] [43] [44]
(R)-2-羟基-3-己酮 (R)-2-hydroxy-3-hexanone		<i>Callidiellum rufipenne</i> <i>Anelaphus inflaticollis</i> <i>Callidiellum rufipenne</i> <i>Xylotrechus pyrrhoderus</i> 青杨虎天牛	[44] [63] [44] [38]
2-羟基-3-己酮 2-hydroxy-3-hexanone		<i>Hylotrupes bajulus</i> 北美家天牛	[22]
3-羟基-2-辛酮 3-hydroxy-2-octanone		<i>Xylotrechus chinensis</i> 桑脊虎天牛	[64]
(R)-3-羟基-2-辛酮 (R)-3-hydroxy-2-octanone		<i>Anaglyptus subfasciatus</i> 柳杉纹虎天牛	[62]
2-羟基-3-辛酮 2-Hydroxy-3-octanone		<i>Xylotrechus quadripes</i> 灭字脊虎天牛 <i>Xylotrechus chinensis</i> 桑脊虎天牛	[23] [64]
S-2-羟基-3-辛酮 S-hydroxy-3-octanone		<i>Xylotrechus chinensis</i> 桑脊虎天牛 <i>Plagionotus detritus</i> ssp 截尾丽虎天牛	[39] [42]
2-羟基-3-癸酮 2-hydroxy-3-decanone		<i>Xylotrechus quadripes</i> 灭字脊虎天牛	[46]
(S)-2-羟基-3-癸酮 (S)-2-hydroxy-3-decanone		<i>Xylotrechus quadripes</i> 灭字脊虎天牛	[23]
3-羟基-2-癸酮 3-hydroxy-2-decanone		<i>Xylotrechus quadripes</i> 灭字脊虎天牛	[23]
2,3-己烷二酮 2,3-hexanedione		<i>Anelaphus inflaticollis</i> <i>Hylotrupes bajulus</i> 北美家天牛	[63] [22]
2,3-辛烷二酮 2,3-octanedione		<i>Tylonotus bimaculatus</i> 双沟天牛 <i>Xylotrechus chinensis</i> 葡萄虎天牛	[44] [64]
2,3-癸烷二酮 2,3-decanedione		<i>Xylotrechus quadripes</i> 灭字脊虎天牛	[23]

续表2

化合物名称 Chemical Name	化学结构 Structure	物种 Species	参考文献 Reference
香叶基丙酮 geranyl acetone		<i>Astyliidius parvus</i> <i>Hedypathes betulinus</i> <i>Lepturges angulatus</i>	[26] [55] [26]
1-(1H-吡咯-2-yl)-1,2-丙anedione 1-(1H-吡咯-2-基)-1,2-丙二酮		<i>Dryobius sexnotatus</i>	[41]
(2S, 3S)-2,3-辛二醇 (2S,3S)-2,3-octadiol		<i>Xylotrechus pyrrhoderus</i> 青杨虎天牛 <i>Xylotrechus quadripes</i> 天字脊虎天牛	[38] [23]
(2R, 3S)-2,3-己二醇 (2R, 3S)-2,3-hexanediols		<i>Anelaphus inflaticollis</i> <i>Hylotrupes bajulus</i> 北美家天牛 <i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛	[63] [22] [50]
(2R, 3R)-2,3-己二醇 (2R, 3R)-2,3-hexanediols		<i>Anelaphus inflaticollis</i> <i>Hylotrupes bajulus</i> 北美家天牛 <i>acuminatus</i> 黑腹尼虎天牛 <i>Xylotrechus colonus</i> 宽斑脊虎天牛 <i>Pyrrhidium sanguineum</i> 栎红天牛	[63] [22] [49] [30] [48]
(2S, 3R)-2,3-己二醇 (2S, 3R)-2,3-hexanediols		<i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛 <i>Sarosesthes fulminans</i> <i>Pyrrhidium sanguineum</i> 栎红天牛	[50] [30] [48]
(2S, 3S)-2,3-己二醇 (2S, 3S)-2,3-hexanediols		<i>Neoclytus acuminatus</i> acuminatus黑腹尼虎天牛 <i>Xylotrechus colonus</i> 宽斑脊虎天牛	[49] [30]
1-丁醇 1-Butanol		<i>Hylotrupes bajulus</i> 北美家天牛	[22]
R-2-甲基-丁醇 (R)-2-methylbutan-1-ol		<i>Phymatodes lecontei</i>	[43]
橙花醇 Nerol		<i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛	[50]
2-(十一烷氧基)-乙醇 2-(undecyloxy)-ethanol		<i>Monochamus alternatus</i> 松褐天牛 <i>Monochamus carolinensis</i> 卡罗林墨天牛 <i>Monochamus galloprovincialis</i> 樟子松墨天牛 <i>Monochamus saltuarius</i> 云杉花墨天牛 <i>Monochamus scutellatus</i> 白点墨天牛 <i>Monochamus sutor</i> 云杉小墨天牛 <i>Monochamus titillator</i> 北美墨天牛	[21] [65] [59] [60] [66] [59] [65]
2-(庚氧基丁氧基)乙醇 2-(heptyloxybutoxy)ethanol		<i>Monochamus leuconotus</i>	[23]
4-(庚氧基)-丁醇 4-(n-heptyloxy)butan-1-ol		<i>Anoplophora glabripennis</i> 光肩星天牛 <i>Anoplophora chinensis</i> 星天牛	[58] [20]
2-Phenylethanol 2-苯基乙醇		<i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛 <i>Xylotrechus quadripe</i> 天字脊虎天牛	[50] [23]
Alpha terpineol $\alpha$ -松油醇		<i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛	[50]

续表 2

化合物名称 Chemical Name	化学结构 Structure	物种 Species	参考文献 Reference
(Z)-3-癸烯醇 (Z)-3-decenol		<i>Rosalia funebris</i> 栾木丽天牛	[51]
<i>S</i> -fusicumol		<i>Astyleiopus variegatus</i>	[67]
		<i>Astyliidius parvus</i> 细小星天牛	[67]
		<i>Tetropium castaneum</i> 光胸断眼天牛	[26]
		<i>Tetropium fuscum</i> 暗褐断眼天牛	[60]
<i>R</i> -fusicumol		<i>Astyleiopus parvus</i>	[26]
		<i>Hedypathes betulinus</i>	[56]
(E)-6, 10-二甲基十一烷-5, 9-二烯醇 Fusicumol		<i>Hedypathes betulinus</i>	[50]
		<i>Tetropium fuscum</i> 暗褐断眼天牛	[25]
		<i>Tetropium cinnamopterum</i> 棕翅断眼天牛	[25]
<i>S</i> -fusicumol acetate		<i>Astyleiopus variegatus</i>	[67]
		<i>Lepturges angulatus</i>	[67]
<i>R</i> -fusicumol acetate		<i>Hedypathes betulinus</i>	[26]
		<i>Lepturges angulatus</i>	[26]
(E)-6, 10-二甲基-5, 9-十一二烯-2-乙酸乙酯 (E)-6,10-dimethyl-5,9-undecadien-2-yl acetate (fusicumol acetate)		<i>Astyliidius parvus</i>	[26]
		<i>Hedypathes betulinus</i>	[26]
(Z)-3-癸烯基(E)-2-己烯酸甲酯 (Z)-3-decenyl(E)-2-hexenoate		<i>Rosalia funebris</i> 栾木丽天牛	[51]
(Z)-3-壬烯基(E)-2-己烯酸酯 (Z)-3-nonenyl(E)-2-hexenoate		<i>Rosalia funebris</i> 栾木丽天牛	[51]
(Z)-3-癸烯基(E)-3-己烯酸酯 (Z)-3-decenyl(E)-3-hexenoate		<i>Rosalia funebris</i> 栾木丽天牛	[51]
香叶醛 Geranial		<i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛	[50]
4-(正庚氧基)丁醛 4-(n-heptyloxy)butanal		<i>Anoplophora chinensis</i> 星天牛	[20]
		<i>Anoplophora glabripennis</i> 光肩星天牛	[57]
10-Methyldodecanal 10-甲基十二烷醛		<i>Eburadacrys vittata</i>	[53]
(6E, 8Z)-6, 8-戊二烯醛 (6E, 8Z)-6,8-Pentadecadienal		<i>Chlorida costata</i>	[52]
		<i>Chlorida festiva</i> 刺膝天牛	[52]
(2E, 6Z, 9Z)-2,6,9-Pentadecatrienal (2E, 6Z, 9Z)-2, 6, 9-戊三烯醛		<i>Elaphidion mucronatum</i> 长刺刺腿天牛	[54]
辛酸 octanoic acid		<i>Xylotrechus quadripes</i> 灭字脊虎天牛	[23]
(3E, 6E)-α-法尼烯 (3E, 6E)-α-farnesene		<i>Anoplophora glabripennis</i> 光肩星天牛	[58]
<i>S</i> -Limonene <i>S</i> -柠檬烯		<i>Megacyllene caryae</i> 厚垫黄带蜂天牛	[50]

性信息素都是由雄虫产生的聚集信息素。目前已鉴定天牛科雄性聚集信息素组分包括酮类 16 种、醇

类 19 种、酯类 4 种、醛类 5 种、酸类 1 种、烯烃 2 种(表 2)。

2.1.1 天牛亚科雄性天牛释放聚集信息素 目前已经从天牛亚科的21个属33个物种中鉴定出聚集信息素组分(表2)。聚集信息素是从天牛科鉴定出来的第一种信息素,羟基酮和2,3-烷基二醇型化合物是首先被鉴定出来的聚集信息素组分类型。Iwabuchi等人鉴定并证明葡萄虎天牛(*Xylotrechus pyrrhoderus*)雄虫产生(*S*)-2-羟基-3-辛酮和(2*S*, 3*S*)-2,3-辛二醇<sup>[38]</sup>;随后的研究结果显示,同属的桑脊虎天牛(*X.chinensis*)和灭字脊虎天牛(*X. quadripes*)也能产生这两种化合物<sup>[23, 39]</sup>。至今,从其它的天牛亚科雄虫中发现的羟基酮和2,3-烷基二醇型化合物包括:从21种天牛亚科物种中发现了(*R*)-3-羟基-2-己酮(表2),如Mitchel等人从*Cyrtophorus verrucosus*和*Orwellion gibbulum arizonense*中鉴定出(*R*)-3-羟基-2-己酮<sup>[40]</sup>,同样,Diesel等人从*Dryobius sexnotatus*中也鉴定出该组分<sup>[41]</sup>,最新的研究结果来自Molander等人从截尾丽虎天牛(*Plagionotus detritus* ssp.)鉴定出该聚集信息素组分<sup>[40-42]</sup>;从宽斑脊虎天牛(*Xylotrechus colonus*)、*Xylotrechus nauticus*和红翅杉天牛(*Callidiellum rufipenne*)中发现了(*S*)-3-羟基-2-己酮<sup>[30, 43-44]</sup>;从柳杉纹虎天牛(*Anaglyptus subfasciatus*)鉴定出(*R*)-3-羟基-2-辛酮<sup>[45]</sup>;从咖啡灭字脊虎天牛(*Xylotrechus quadripes chevrolat*)鉴定出的(*S*)-2-羟基-3-癸酮和3-羟基-2-癸酮<sup>[46-47]</sup>;从北美家天牛(*Hylotrupes bajulus*)鉴定出(2*R*, 3*S*)-2,3-己二醇和(2*R*, 3*R*)-2,3-己二醇;从*Pyrrhidium sanguinium*鉴定出(2*S*, 3*R*)-2,3-己二醇;以及从黑腹尼虎天牛(*Neoclytus acuminatus*)鉴定出(2*S*, 3*S*)-2,3-己二醇<sup>[22, 48-49]</sup>。羟基酮和2,3-烷基二醇型化合物在天牛亚科中是高度保守的,来自不同的属、群落以及不同大陆的物种,都使用这些密切相关的结构,这两种类型化合物已被鉴定为世界上不同地区许多天牛品种的信息素组分或可能的信息素组分(表2)。如2,3-烷基二醇型化合物从天牛亚科的5个物种中发现,但是经常在来自雄性天牛的顶空挥发物中发现,迄今为止,没有证据表明它们是引诱剂或增效剂。此外,Zou等人从双沟天牛(*Tylonotus bimaculatus*)发现的(2*S*,4*E*)-2-hydroxyoct-4-en-3-one和(3*R*,4*E*)-3-hydroxyoct-4-en-2-one,是羟基酮类化合物的第一个变体,即不饱和和类似物<sup>[44]</sup>。

除了羟基酮和2,3-烷基二醇型信息素之外,有证据表明,天牛亚科还存在许多其它结构的聚集信息素(表2)。例如,已经从几种不同的物种中鉴定出非常小且结构简单的化合物如1-丁醇和2-甲基丁醇的对映体。其它物种,例如从北美本土的双沟天牛(*Tylonotus bimaculatus*)中发现的(*E*)-4-辛烯-2,3-二酮,厚垫黄带蜂天牛(*Megacyllene caryae*)具有由萜类化合物如香叶醛和橙花醛组成的信息素<sup>[44, 50]</sup>。而桤木丽天牛(*Rosalia funebris*)产生酯类化合物如(*Z*)-3-壬烯基, (*E*)-2-己烯酸酯, (*Z*)-3-癸烯基 (*E*)-3-己烯酸酯和(*Z*)-3-癸烯基 (*E*)-2-己烯酸酯,这些酯类物质与许多鞘翅类昆虫产生的信息化合物相似<sup>[51]</sup>。Zou等人在日本进行针对红翅杉天牛的田间试验时发现,其雌成虫和雄成虫能被外消旋的3-羟基己-2-酮和一种新型天然产物1-(1*H*-吡咯-2-基)-1,2-丙二酮的混合物所吸引<sup>[44]</sup>,后Diesel等人从来自北美、南美以及亚洲*Dryobius sexnotatus*雄虫的顶空挥发物中鉴定出此种新的吡咯结构<sup>[41, 44]</sup>;此外,最近发现的信息化合物包括不饱和直链醛(6*E*, 8*Z*)-6,8-戊二烯醛、10-甲基十二烷醛和(2*E*, 6*Z*, 9*Z*)-2, 6, 9-戊三烯醛<sup>[52-54]</sup>。

2.1.2 沟胫天牛亚科昆虫雄性信息素组分研究 目前已经从6个属13种沟胫天牛亚科中鉴定出聚集信息素组分(表2),其中已知或可疑的物种信息素组分有两种主要结构类别。第一类由香叶基丙酮(*Geranyl acetone*)、(*E*)-6,10-二甲基十一烷-5,9-二烯-2-醇(*fuscumol*)及其乙酸酯*fuscumol acetate*三种化合物组成(表2)。*fuscumol*和*fuscumol acetate*两种组分各有两种对映体形式,从巴西*Hedypathes betulinus*雄虫中鉴定出这两种组分以及它们的4种对映体形式,单个化合物本身不具有吸引力,但是香叶基丙酮、*fuscumol acetate*和*fuscumol*3种组分的混合物可吸引天牛雌成虫<sup>[55-56]</sup>。最近的一项研究表明,在北美沟胫天牛亚科天牛发现了相对罕见的对映体协同作用现象,细小星天牛(*Astyliidius parvus*)雄虫产生(*R*)-and (*S*)-*fuscumol*+(*R*)-*fuscumol acetate*+香叶丙酮,而*Lepturges angulatus*雄性产生(*R*)-and (*S*)-*fuscumol acetate*+香叶丙酮,这些对映体混合物可吸引相应的天牛雌成虫<sup>[26]</sup>。这些研究结果表明对映体协同作用在沟胫天牛亚科内可能是常见的。

从沟胫天牛亚科物种中发现的第二类信息素结构由羟基醚和相关化合物组成。从光肩星天牛 (*Anoplophora glabripennis*) 中鉴定出 4-(庚氧基)-丁醇和 4-(正庚氧基)丁醛的混合物<sup>[57-58]</sup>。而后又从亚洲同属雄性星天牛 (*Anoplophora chinensis*) 的顶空挥发物中鉴定出这两种成分, 但仅有 4-(庚氧基)-丁醇能够引起星天牛触角反应, 并且该化合物在田间试验中可吸引两性的星天牛成虫<sup>[20]</sup>。一种相关的信息素组分 2-(十一烷氧基)-乙醇 (monochamol) 最初从欧洲的樟子松墨天牛 (*Monochamus galloprovincialis*) 鉴定出来<sup>[59]</sup>, 现已经被证明是一些原产于欧亚大陆和北美的 12 种同属物种的信息素组分或可能的信息素组

分, 其中已经从同属的 6 种天牛中鉴定出来 (表 3)。最新的发现是 2-(十一烷氧基)-乙醇已从来自亚洲的云杉花墨天牛 (*Monochamus saltuarius*) 鉴定出来, 并且该化合物与 (-)- $\alpha$ -pinene 等增效剂混合使用比单独使用更具吸引力<sup>[48]</sup>。此外, 2-(十一烷氧基)-乙醇还可吸引沟胫天牛亚科其它 8 个属的 9 种天牛物种, 这表明它代表另一个高度保守的信息素基序。然而, 非洲 *Monochamus leuconotus* 是一个例外, 因为其雄虫会产生不同的羟基醚, 2-(庚氧基丁氧基)乙醇<sup>[23, 25]</sup>。此外, 光肩星天牛雄虫顶空挥发物中还存在另外一种结构 (3*E*, 6*E*)- $\alpha$ -法尼烯, 雌雄成虫都能被其吸引, 并且其与另外两种结构 4-(庚氧基)-丁醇和 4-(正庚氧基)丁醛混

表 3 天牛科昆虫雌性性信息素成分及来源

Table 3 Pheromones components and sources produced by females of Cerambycidae

化合物名称Chemical name	化学结构Structure	物种Species	参考文献Reference
(2 <i>R</i> , 3 <i>R</i> )-2,3-己二醇(2 <i>R</i> , 3 <i>R</i> )-2,3-hexanediols		<i>Tragosoma depsarium</i> sp	[74]
(2 <i>S</i> , 3 <i>R</i> )-2,3-己二醇(2 <i>S</i> , 3 <i>R</i> )-2,3-hexanediols		<i>Tragosoma depsarium harrisi</i> <i>Tragosoma pilosicorne</i>	[74] [74]
(2 <i>R</i> , 3 <i>S</i> )-2,3-辛二醇(2 <i>R</i> , 3 <i>S</i> )-2,3-octanediol		<i>Megopis costipennis</i> 脊薄翅天牛	[27]
顺式-11-十八烯-2-乙酸乙酯Cis-vaccenyl acetate		<i>Ortholeptura valida</i>	[24]
( <i>R</i> )-去氨内酯( <i>R</i> )-desmolactone		<i>Desmocerus californicus</i>	[76]
(3 <i>R</i> , 5 <i>S</i> )-3,5-二甲基十二烷酸(3 <i>R</i> , 5 <i>S</i> )-3,5-dimethyldodecanoic acid		<i>Prionus californicus</i>	[77]
3,5-二甲基十三烷酸3,5-dimethyltridecanoic acid		<i>Prionus californicus</i>	[77]
3,5-二甲基十五烷酸3,5-dimethylpentadecanoic acid		<i>Prionus californicus</i>	[77]
3,5-二甲基十二烷酸3,5-dimethyldodecanoic acid		<i>Prionus californicus</i>	[68]
( <i>Z</i> )-21-甲基-8-辛三烯( <i>Z</i> )-21-methyl-8-pentatriacontene		<i>Psacotheta hilaris</i> 兰屿黄星天牛	[78]

合使用能增强其引诱效果<sup>[58]</sup>。还有待观察的是,在沟胫天牛亚科物种中是否会发现新的信息素结构,以及它们是否会像在天牛亚科中的物种中出现的那样多样化。

**2.1.3 椎天牛亚科昆虫雄性信息素组分研究** 椎天牛亚科物种的所有已知或疑似信息素都含有在沟胫天牛亚科物种中出现过的香叶基丙酮结构类中(表2)。事实上, fuscumol 首先从古北海的暗褐断眼天牛(*Tetropium fuscum*)和北美洲的棕翅断眼天牛(*T. cinnamopterum*)中鉴定出来<sup>[25, 61]</sup>。在野外试验中,外消旋的 fuscumol 和(S)-fuscumol 与宿主植物挥发物混合使用可吸引暗褐断眼天牛、棕翅断眼天牛和光胸断眼天牛(*T. castaneum*)的雌雄成虫,而(R)-fuscumol 单独与宿主植物挥发物混合使用没有捕获任何天牛<sup>[61]</sup>。这个试验结果表明在这些物种具有同源性的情况下可能发生交叉吸引,并且可能通过近距离信号的差异发生生殖隔离。总体而言,仅从这个相对较小的亚科的少数物种中鉴定出信息素或可能的信息素,所以不可能预测这个亚科是否会变成具有多样性的信息素结构。

## 2.2 雌性天牛释放性信息素

迄今为止,锯天牛亚科 Prioninae,花天牛亚科 Lepturinae 两个亚科中的所有物种,其挥发性信息素都是由雌虫产生的性信息素;天牛科雌性性信息素组分包括醇类3种、酯类2种、酸类4种、烯炔1种(表3)。

**2.2.1 锯天牛亚科昆虫雌性产生的性信息素组分研究** 天牛科昆虫雌虫产生的第一个性信息素组分(3R, 5S)-3,5-二甲基十二烷酸来自锯天牛亚科,又称为丙酸<sup>[68-69]</sup>。*P. californicus* 雌虫性信息素可能由产卵器上的一个可逆的腺体产生,其排放量非常少<sup>[70]</sup>。该组分有着很强的吸引力,含有不足1 mg剂量的诱饵可吸引数百米外的雄虫,并且在数周内保持吸引力。丙酸含有3种“非天然”立体异构体,并且三者不相互抑制,*P. californicus* 雄成虫可被雌虫产生的丙酸所吸引,也能被3,5-二甲基十二烷酸的4种立体异构体所组成的混合物所吸引,所以相对便宜的4种立体异构体混合物可用于诱饵<sup>[69]</sup>。研究表明,这4种立体异构体的混合物对欧洲的 *Prionus coriarius* 和6种北美锯天牛亚科物种的雄虫都具有吸引力<sup>[71-72]</sup>。此外,研究者发现丙酸对亚洲的 *Dorysthenes granulosus* 的雄虫具有高度吸

引力<sup>[27]</sup>。表明在这两个属中信息素存在相同或相似的结构。这种化合物是否会吸引亚洲其它的物种仍有待观察<sup>[73]</sup>。

在锯天牛亚科的其它属中发现了由雌虫产生的性信息素的第二个组分2,3-烷炔二醇(表2)。*Tragosoma* 属3个物种的雌虫分别产生2,3-己二醇的两种立体异构体,并且这些异构体可作为引诱剂吸引雄虫<sup>[74]</sup>。亚洲 *Megopis costipennis* 的性信息素由(2R, 3S)-2,3-辛二醇组成<sup>[27]</sup>。锯天牛亚科雌虫和沟胫天牛亚科雄虫产生这种类型信息素的腺体似乎相似,2,3-链烷二醇结构常被沟胫天牛亚科许多物种用作聚集性信息素<sup>[27]</sup>。

**2.2.2 花天牛亚科昆虫雌性信息素组分研究** 花天牛亚科物种中也鉴定出由雌虫产生的性信息素组分(表2)。从 *Ortholeptura valida* 鉴定出的第一个信息素由顺式-乙酸乙酯组成。这种化学物质也是雄果蝇信息素成分之一<sup>[24]</sup>。另一种组分(R)-去氨内酯由研究者在美国加利福尼亚的 *Desmocerus californicus californicus* 鉴定出来,并且作为美国4个地区 *Desmocerus* 属4个物种的性引诱剂,包括濒危的 *D. californicus dimorphus*<sup>[75]</sup>。性信息素的使用在该亚科中很常见,但目前其它组分结构并未确定。

## 3 天牛科信息素组分的特殊结构

近年来对鞘翅目天牛科昆虫信息化合物的研究表明,天牛信息化合物不仅在不同亚科、属和种间存在许多相似结构,两个不同目昆虫也会出现相似结构,如天牛科天牛亚科的两个不同属物种首次鉴定出烯醛类化合物,这是一种新的天牛科昆虫信息化合物结构,分别是2016年 Silva 从 *Chlorida costata* 和刺膝天牛 *Chlorida festiva* 中鉴定出(6E, 8Z)-6, 8-戊二烯醛,这是首次从天牛科昆虫中鉴定出直链烯醛结构,2017年 Millar 等从天牛亚科另一个不同属物种长刺刺腿天牛 *Elaphidion mucronatum* 中鉴定出直链烯醛(2E, 6Z, 9Z)-2, 6, 9-戊三烯醛<sup>[52, 54]</sup>,这两种信息化合物作为天牛雄虫产生的聚集信息素组分在两性天牛中发挥引诱作用。烯醛类结构一般常见于鳞翅目昆虫中,是鳞翅目如螟蛾科昆虫性信息素组分常见结构,现在鞘翅目中也鉴定出此种结构化合物,鳞翅目与鞘翅目昆虫通过信息化合物建立联系, Fukaya 等人从天牛科兰屿黄星天牛雌虫



中鉴定出(Z)-21-甲基-8-戊三烯<sup>[78]</sup>,这是雌虫产生的性信息素组分,自此至2014年,Crook等人从光肩星天牛中鉴定出(3E,6E)- $\alpha$ -法尼烯,这是一种雄虫产生的聚集信息素组分<sup>[58,78]</sup>。目前,天牛科昆虫仅发现这两种长链多烯烃结构,此种结构在鞘翅目中极少见,却是鳞翅目昆虫另一种性信息素组分常见结构。

## 4 墨天牛属昆虫信息化合物研究

### 4.1 墨天牛属昆虫信息化合物研究进展

墨天牛属(*Monochamus*)属鞘翅目 Coleoptera 多食亚目 Polyphaga 叶甲总科 Chrysomeloidea 天牛科 Cerambycidae 沟胫天牛亚科 Lamiinea,其部分种类是传播松材线虫病重要媒介昆虫,随着对墨天牛属昆虫的深入研究,人们逐步认识到调节其行为活动的信息化学物质在害虫治理中的应用潜力和广阔前景,因此,在天牛科(Cerambycidae)昆虫的所有研究中,从其化学生态学角度来看,墨天牛属是研究较多的群体之一<sup>[5,71]</sup>。迄今为止,墨天牛属昆虫产生的挥发性信息素都是聚集信息素,其中,8种物种的雄虫中鉴定出2种聚集信息素组分,分别是2-(十一烷氧基)-乙醇和2-(庚氧基丁氧基)乙醇,包括松褐天牛在内的7种物种鉴定出2-(十一烷氧基)-乙醇,另外一种结构2-(庚氧基丁氧基)乙醇则只在*Monochamus leuconotus*中鉴定出来(表3)。

Fauziah等首先报道了墨天牛属松褐天牛存在信息素<sup>[72]</sup>。直到2010年,Pajares等从来自欧洲与北非的樟子松墨天牛(*Monochamus galloprovincialis*)中鉴定出来2-(十一烷氧基)-乙醇(mono-chamol),

表4 未鉴定出信息化合物的墨天牛属天牛诱捕试验

Table 4 The trapping test of the *Monochamus* without identification of pheromone compound

天牛物种Species	引诱剂Attractant	试验Test	参考文献Reference
<i>Monochamus bimaculatus</i> 二斑肖墨天牛	2-十一烷氧基-1-乙醇2-undecyloxy-1-ethanol	在中国南方热带雨林进行诱捕试验,该天牛的雌雄成虫均大量被诱捕	[82]
<i>Monochamus clamator</i> 粗点墨天牛	2-十一烷氧基-1-乙醇、 $\alpha$ -蒎烯和乙醇三者混合物A mixture of 2-undecyloxy-1-ethanol, $\alpha$ -pinene and ethanol	在加拿大不列颠哥伦比亚省南部进行诱捕试验,该天牛被大量诱捕	[83]
<i>Monochamus notatus</i> 墨点墨天牛	2-十一烷氧基-1-乙醇2-undecyloxy-1-ethanol	在纽约的一些森林进行诱捕试验,该天牛雌雄成虫被大量诱捕,诱捕到的雌成虫大约是雄成虫的两倍	[66]
<i>Monochamus obtusus</i> 钝角墨天牛	2-十一烷氧基-1-乙醇、 $\alpha$ -蒎烯和乙醇三者混合物A mixture of 2-undecyloxy-1-ethanol, $\alpha$ -pinene and ethanol	在加拿大不列颠哥伦比亚省南部进行诱捕试验,该天牛被大量诱捕	[83]
<i>Monochamus scutellatus</i> 密毛白点墨天牛	2-十一烷氧基-1-乙醇、 $\alpha$ -蒎烯和乙醇三者混合物A mixture of 2-undecyloxy-1-ethanol, $\alpha$ -pinene and ethanol	在加拿大不列颠哥伦比亚省南部进行诱捕试验,该天牛被大量诱捕	[83]

研究表明该化合物属于聚集信息素,这是从墨天牛属物种中被鉴定出来的首个信息化合物<sup>[59]</sup>。之后,在同属的松墨天牛(*M. alternatus*)、卡罗林墨天牛(*M. carolinensis*)、南美墨天牛(*M. titillator*)、白点墨天牛(*M. scutellatus*)、云杉大墨天牛(*M. sutor*)和云杉花墨天牛(*M. saltuarius*)6种物种中也发现了相同的聚集信息素<sup>[21,60,66,65,79]</sup>。

### 4.2 墨天牛属天牛的国内外防控研究进展

天牛目前已成为世界性害虫,考虑对生态环境的保护,天牛化学通讯中使用的信息化学物质在害虫综合治理中具有很大的开发潜力,利用信息化合物能够调控天牛行为的特性进行防虫和虫情监测日益受到重视,这些信息化学物质主要为天牛自身释放的信息素和植物源挥发物,在害虫综合治理中可充分有效利用这些物质<sup>[80]</sup>。

已有的研究表明,天牛的雌雄成虫均可释放信息素来达到两性间通讯联系的目的,如墨天牛属的南美墨天牛的雌雄成虫均可释放信息素,但是雄虫释放的是具有挥发性的聚集信息素,而雌虫释放不具有挥发性的接触信息素<sup>[73]</sup>。一般认为,雌虫首先受到远距离雄性释放的挥发性信息素的吸引,并逐渐趋向静息的雄虫,雄虫又受到近距离雌性产生的信息素的刺激而变得兴奋,进而产生交配行为<sup>[81]</sup>。雄性昆虫性信息素引诱雌性昆虫后,产生行为上的反应和生理上的变化,可为利用雄性昆虫性信息素防治害虫提供依据<sup>[19]</sup>。根据已有的证据结果显示,除了南美墨天牛能产生两种信息素,其它墨天牛属天牛只从雄虫鉴定出聚集信息素,因此天牛主要是靠雄成虫释放信息素来引诱雌成虫,如松褐天牛、卡罗林墨天牛和云杉花墨天牛等<sup>[21,60,65]</sup>。墨天牛属常

见信息化合物 2-十一烷氧基-1-乙醇对成熟雌成虫有明显的吸引作用,可作为许多墨天牛属天牛的性引诱剂,如包括二斑肖墨天牛(*Monochamus bimaculatus*)在内的 5 种天牛虽没被鉴定出 2-十一烷氧基-1-乙醇,但能被 2-十一烷氧基-1-乙醇或 2-十一烷氧基-1-乙醇与  $\alpha$ -蒎烯和乙醇的混合物所吸引,利用信息化合物可以达到很好的诱杀效果(表 4)。

## 5 展望

本综述总结有关天牛科昆虫信息化合物的国内外研究进展,对信息化合物在天牛防控方面的作用进行描述。目前天牛信息化合物在野外的使用主要以诱杀为主,利用信息化合物作为引诱剂引诱天牛,从而实现监测、预防和控制天牛的目的。由于天牛科昆虫中许多种都是重要的林业害虫,危害严重,且有些种只在我国分布,因此其信息化合物的研究工作仍然具有重大意义。本综述对该科已鉴定的信息化合物作系统分析,能够为后续鉴定天牛其它种类信息化合物提供理论依据。

根据本综述,可以确定的是,未来对天牛信息化合物的研究有以下几个重要方面,首先根据研究结果,还有许多信息化合物结构还未鉴定,特别是至今仍然没有从 Parandrinae, Necydalinae 和 Dorcasominae 3 个亚科物种中鉴定出信息素组分,因此对信息素组分进行鉴定仍然需要加强。其次,鉴定新的信息素组分结构不仅能丰富信息素类型,而且在对物种、属以及科之间的进化关系的研究也具有重大的意义,近年来,对信息化合物的研究快速增长,但天牛种群间联系未有了解,如尚不清楚为什么天牛亚科,沟胫天牛亚科和椎天牛亚科似乎只有雄虫释放聚集信息素,而锯天牛亚科和花天牛亚科似乎只有雌虫释放的性信息素,其它的问题如为什么同一种信息化合物可以吸引不同种,甚至不同属的天牛?几种雄性天牛产生的信息素组分是天牛典型聚集信息素组分,但用这些化学组分吸引这几种天牛的试验都失败了,例如,枫糖天牛(*Glycobius speciosus*)和重要的爆发害虫栎红天牛(*Enaphalodes rufulus*)都产生 2,3-己二醇的两种异构体,但单独或混合使用 2,3-己二醇外消旋或手性化合物做天牛引诱试验都失败了。对于天牛信息化合物,还有很多问题尚未解决。还有,现如今利用信息素作为引诱剂诱捕天牛受到许多研究者的

热捧,许多诱捕器装置被不断改进,但是引诱剂仍然是薄弱环节,例如引诱剂的有效期以及运输等仍需要改进。

今后天牛科昆虫信息化合物的鉴定、应用和合成仍然是国内外研究的热点之一。随着实验技术的改进和基础研究的深入,关于天牛信息化合物的研究必将取得较大的进展,将信息化合物应用于林业害虫防治的前景将更加美好。

## 参考文献:

- [1] 嵇保中,魏勇,黄振裕.天牛成虫行为研究的现状与展望[J].南京林业大学学报:自然科学版,2002,26(2):79-83.
- [2] Lawrence J F. Coleoptera[M]. USA, New York, McGraw Hill, Parker SP (ed.). Synopsis and classification of living organisms, vol 2. 1982, 482-553.
- [3] Solomon J D. Guide to insect borers in north american broadleaf trees and shrubs[M]. U. S. Department of Agriculture-Forest Service, Washington, DC. 1995.
- [4] Ginzel M D, Blomquist G J, Millar J G, et al. Role of contact pheromones in mate recognition in *Xylotrechus colonus*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2003, 29(3): 533-545.
- [5] Allison J D, Borden J H, Seybold S J. A review of the chemical ecology of the Cerambycidae (Coleoptera)[J]. Chemoecology, 2004, 14(3-4): 123-150.
- [6] 魏建荣,杨忠岐,杜家纬.天敌昆虫利用信息化学物质寻找寄主或猎物的研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2563-2573.
- [7] 朱诚棋,王博,沈婧,等.松墨天牛综合防治进展[J].中国植保导刊,2017,37(2):19-24.
- [8] 史先慧,马涛,陆雪雷,等.松墨天牛成虫行为与化学生态学研究进展[J].林业科学研究,2017,30(5):854-865.
- [9] 马涛,刘志韬,孙朝辉,等. APF-I型引诱剂监测松墨天牛种群动态试验[J].中国森林病虫,2016,35(02):21-23.
- [10] Ma T, Shi X, Shen J, et al. Field evaluation of commercial attractants and trap placement for monitoring pine sawyer beetle, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in Guangdong, China[J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(1): 239-246.
- [11] Brockerhoff E G, Jones D C, Kimberley M O, et al. Nationwide survey for invasive wood-boring and bark beetles (Coleoptera) using traps baited with pheromones and kairomones[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 228(1): 234-240.
- [12] Haack R A. Exotic bark-and wood-boring coleoptera in the united states: recent establishments and interceptions[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(2): 269-288.
- [13] Liebhold A M, Macdonald W L, Bergdahl D, et al. Invasion by exotic forest pests: a threat to forest ecosystems[J]. Forest Science, 1995, 30(2): 120-126.
- [14] Nowak D J, Pasek J E, Sequeira R A, et al. Potential effect of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) on urban trees in the United States[J]. Journal of Economic Entomology, 2001, 94(1): 116-122.

- [15] 吕 飞, 海小霞, 王志刚, 等. 天牛视觉感受机制研究进展[J]. 林业科学, 2015, 51(9): 134-140.
- [16] Hanks L M, Millar J G. Sex and aggregation-sex pheromones of cerambycid beetles: basic science and practical applications[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2016, 42(7): 631-654.
- [17] 程 彬, 孙 伟, 张 健. 天牛信息素的研究进展[J]. 中国森林病虫害, 2012, 31(3): 29-34.
- [18] 马 涛, 张 蒙, 朱雪姣, 等. 螟蛾总科昆虫性信息素活性组分及结构特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12):3378-3384.
- [19] 马 涛, 黄志嘉, 朱 映, 等. 尺蛾科昆虫性信息素组分特征及应用进展[J]. 林业科学, 2019, 55(5): 152-162.
- [20] Hansen L, Xu T, Wickham J, *et al.* Correction: identification of a male-produced pheromone component of the citrus longhorned beetle, *Anoplophora chinensis*[J]. *Plos One*, 2015, 10(12): e0145355.
- [21] Teale S A, Wickham J D, Zhang F, *et al.* A male-produced aggregation pheromone of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), a major vector of pine wood nematode[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2011, 104: 1592-1598.
- [22] Fettk other R, Dettner K, Schr oder F, *et al.* The male pheromone of the old house borer *Hylotrups bajulus* (L.) (Coleoptera: Cerambycidae): identification and female response[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 1995, 51: 270-277.
- [23] Hall D R, Cork A, Phythian S J, *et al.* Identification of components of male-produced pheromone of coffee white stemborer, *Xylotrechus quadripes*[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2006, 32(1): 195-219.
- [24] Ray A M,  unic A, Alten R L, *et al.* Cis-vaccenyl acetate, a female-produced sex pheromone component of *Ortholeptura valida*, a longhorned beetle in the subfamily Lepturinae[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2011, 37: 173-178.
- [25] Silk P J, Sweeney J, Wu J, *et al.* Evidence for a male-produced pheromone in *Tetropium fuscum*, (f.) and *Tetropium cinnamopterum*(kirby) (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Naturwissenschaften*, 2007, 94(8): 697-701.
- [26] Meier L R, Zo uY, Millar J G, *et al.* Synergism between enantiomers creates species-specific pheromone blends and minimizes cross-attraction for two species of cerambycid beetles[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2016, 42(11): 1181-1192.
- [27] Wickham J D, Millar J G, Hanks L M, *et al.* (2R, 3S)-2, 3-octanediol, a female-produced sex pheromone of *Megopis costipennis* (Coleoptera: Cerambycidae: Prioninae)[J]. *Environmental Entomology*, 2016, 45: 223-228.
- [28] Allison J D, McKenney J L, Miller D R, *et al.* Kairomonal responses of natural enemies and associates of the southern Ips (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) to ipsdienol, ipsenol, and vis-verbenol[J]. *Journal of Insect Behavior*, 2013, 26: 321-335.
- [29] Leal W S, Bento J M S, Vilela E F, *et al.* Female sex pheromone of the longhorn beetle *Migdolus fryanus* Westwood: N-(2S)-methylbutanoyl 2-methylbutylamine[J]. *Experientia*, 1994, 50(9): 853-856.
- [30] Lacey E S, Millar J G, Moreira J A, *et al.* Male-produced aggregation pheromones of the Cerambycid beetles *Xylotrechus colonusand-Sarosesthes fulminans*[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2009, 35(6): 733-740.
- [31] Sweeney J D, Silk P J, Grebennikov V. Efficacy of semiochemical-baited traps for detection of longhorn beetles (Coleoptera: Cerambycidae) in the Russian Far East[J]. *European Journal of Entomology*, 2014, 111(3): 397-406.
- [32] Moore B P, Brown W V. Chemical defence in longhorn beetles of the genera *stenocentrus* and *syllitus* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Austral Entomology*, 2014, 10(3): 230-232.
- [33] Boyer F D, Malosse C, Zagatti P, *et al.* ChemInform Abstract: Identification and synthesis of vesperal, the female sex pheromone of the longhorn beetle *Vesperus xatarti*[J]. *Bulletin de la Societe chimique de France*, 1997, 134(8-9): 757-764.
- [34] Hanks L M, Wang Q. Reproductive biology of cerambycid beetles. In: Wang Q (ed) *Cerambycidae of the world: Biology and management*. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, 2017.
- [35] Yasui H. Chemical communication in mate location and recognition in the white-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2009, 44(2): 183-194.
- [36] Yasui H, Yasuda T, Fukaya M, *et al.* Host plant chemicals serve intraspecific communication in the white-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* (Thomson) (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2007, 42 ( 2 ) : 255-268.
- [37] Yasui H, Akino T, Fukaya M, *et al.* Sesquiterpene hydrocarbons: kairomones with a releaser effect in the sexual communication of the white-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* (Thomson) (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Chemoecology*, 2008, 18: 233-242.
- [38] Iwabuchi K, Takahashi J, Nakagawa Y. Behavioral responses of female grape borer *Xylotrechus pyrrhoderus* bates (Coleoptera: Cerambycidae) to synthetic male sex pheromone components[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1986, 21(1): 21-27.
- [39] Iwabuchi K, Takahashi J, Sakai T. Occurrence of 2, 3-octanediol and 2-hydroxy-3-octanone, possible male sex pheromone in *Xylotrechus chinensis* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1987, 22(1): 110-111.
- [40] Mitchell R F, Millar J G, Hanks L M. Blends of (R)-3-hydroxyhexan-2-one and alkan-2-ones identified as potential pheromones produced by three species of cerambycid beetles[J]. *Chemoecology*, 2013, 23(2): 121-127.
- [41] Diesel N M, Zou Y, Johnson T D, *et al.* The rare north American cerambycid beetle *Dryobius sexnotatus* shares a novel pyrrole pheromone component with species in Asia and South America[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2017, 43: 739-744.
- [42] Molander M A, Helgesson J, Winde I B. The male-produced aggregation-sex pheromone of the cerambycid beetle *Plagionotus detritus* ssp. *Detritus*[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2019, 45: 28-36.
- [43] Hanks L M, Millar J G, Moreira J A, *et al.* Using generic pheromone lures to expedite identification of aggregation pheromones for the cerambycid beetles *Xylotrechus nauticus*, *Phymatodes lecontei*, and *Neocyclus modestus* modestus[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33(5): 889-907.
- [44] Zou Y, Millar J G, Blackwood J S, *et al.* (2S, 4E)-2-hydroxy-4-octen-3-one, a male-produced attractant pheromone of the cerambycid beetle *Tylonotus bimaculatus*[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2015, 41(7): 670-677.

- [45] Leal W S, Shi X, Nakamuta K, *et al.* Structure, stereochemistry, and thermal isomerization of the male sex pheromone of the longhorn beetle *Anaglyptus subfasciatus*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1995, 92(4): 1038-1042.
- [46] Jayarama, Venkatesha M G, D'Souza M V, *et al.* Sex pheromone of coffee white stem borer for monitoring and control is on the anvil[J]. Indian Coffee, 1998, 62(9): 15-16.
- [47] Rhainds M, Lan C C, King S, *et al.* Pheromone communication and mating behaviour of coffee white stem borer, *Xylotrechus quadripes* chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Applied Entomology and Zoology, 2001, 36(3): 299-309.
- [48] Schröder F, Fettköther R, Noldt U, *et al.* Synthesis of (3R)-3-hydroxy-2-hexanone, (2R, 3R)-2, 3-hexanediol and (2S, 3R)-2, 3-hexanediol, the male sex pheromone of *Hylotrupes bajulus* and *Pyrrhidium sanguineum* (Cerambycidae)[J]. European Journal of Organic Chemistry, 1994: 1211-1218.
- [49] Lacey E S, Ginzel M D, Millar J G, *et al.* Male-produced aggregation pheromone of the cerambycid beetle *Neoclytus acuminatus* acuminatus[J]. Journal of Chemical Ecology, 2004, 30(8): 1493-1507.
- [50] Lacey E S, Moreira J A, Millar J G. A male-produced aggregation pheromone blend consisting of alkanediols, terpenoids, and an aromatic alcohol from the cerambycid beetle *Megacyllene caryae*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2008, 34: 408-417.
- [51] Ray A M, Millar J G, McElfresh J S, *et al.* Male-produced aggregation pheromone of the cerambycid beetle *Rosalia funebris*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2009, 35(1): 96-103.
- [52] Silva W D, Millar J G, Hanks L M, *et al.* (6E, 8Z)-6, 8-Pentadecadienal, a novel attractant pheromone produced by males of the cerambycid beetles *Chlorida festiva* and *Chlorida costata*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2016, 42(10): 1082-1085.
- [53] Silva W D, Millar J G, Hanks L M, *et al.* 10-Methyl dodecanal, a novel attractant pheromone produced by males of the South American cerambycid beetle *Eburadacrys vittata*[J]. Plos One, 2016, 11: e0160727.
- [54] Millar J G, Mitchell R F, Meier L R, *et al.* (2E, 6Z, 9Z)-2, 6, 9-Pentadecatrienal as a male-produced aggregation-sex pheromone of the cerambycid beetle *Elaphidion mucronatum*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2017, 43: 1056-1065.
- [55] Fonseca M G, Vidal D M, Zarbin P H G. Male-produced sex pheromone of the cerambycid beetle *Hedypathes betulinus*: chemical identification and biological activity[J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(10): 1132-1139.
- [56] Vidal D M, Fonseca M G, Zarbin P H G. Enantioselective synthesis and absolute configuration of the sex pheromone of *Hedypathes betulinus* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Tetrahedron Letters, 2010, 51: 6704-6706.
- [57] Zhang A, Oliver J E, Aldrich J R, *et al.* Stimulatory beetle volatiles for the Asian longhorned beetle, *Anoplophora glabripennis* (motschulsky)[J]. Zeitschrift Für Naturforschung C, 2002, 57(5-6): 553-558.
- [58] Crook D J, Lance D R, Mastro V C. Identification of a potential third component of the male-produced pheromone of *Anoplophora glabripennis* and its effect on behavior[J]. Journal of Chemical Ecology, 2014, 40(11-12): 1241-1250.
- [59] Pajares J A, Alvarez G, Ibeas F, *et al.* Identification and field activity of a male-produced aggregation pheromone in the pine sawyer beetle, *Monochamus galloprovincialis*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(6): 570-583.
- [60] Lee H R, Lee S C, Lee D H, *et al.* Identification of the aggregation-sex pheromone produced by male *Monochamus saltuarius*, a major insect vector of the pine wood nematode[J]. Journal of Chemical Ecology, 2017, 43(7): 670-678.
- [61] Sweeney J D, Silk P J, Gutowski J M, *et al.* Effect of chirality, release rate, and host volatiles on response of *Tetropium fuscum* (f.), *Tetropium cinnamopterum* kirby, and *Tetropium castaneum* (L.) to the aggregation pheromone, fuscumol[J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(12): 1309-1321.
- [62] Nakamuta K, Leal W S, Nakashima T, *et al.* Increase of trap catches by a combination of male sex pheromones and floral attractant in longhorn beetle, *Anaglyptus subfasciatus*[J]. Journal of Chemical Ecology, 1997, 23(6): 1635-1640.
- [63] Ray A M, Swift I P, Moreira J A, *et al.* (R)-3-hydroxyhexan-2-one is a major pheromone component of *Anelaphus inflaticollis* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Environmental Entomology, 2009, 38(5): 1462-1466.
- [64] Kuwahara Y, Matsuyama S, Suzuki T. Identification of 2, 3-octanediol, 2-hydroxy-3-octanone and 3-hydroxy-2-octanone from male *Xylotrechus chinensis* chevrolat as possible sex pheromones (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Applied Entomology and Zoology, 2008, 22(1): 25-28.
- [65] Allison J D, McKenney J L, Millar J G, *et al.* Response of the wood-borers *Monochamus carolinensis* and *Monochamus titillator* (Coleoptera: Cerambycidae) to known cerambycid pheromones in the presence and absence of the host plant volatile  $\alpha$ -pinene[J]. Environmental Entomology, 2012, 41(6): 1587-1596.
- [66] Fierke M K, Skabeikis D D, Millar J G, *et al.* Identification of a male-produced aggregation pheromone for *Monochamus scutellatus* scutellatus and an attractant for the congener *Monochamus notatus* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2012, 105(6): 2029-2034.
- [67] Hughes G P, Zou Y, Millar J G, *et al.* (S)-fuscumol and (S)-fuscumol acetate produced by a male *Astyleiopus variegatus* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Canadian Entomologist, 2013, 145(3): 327-332.
- [68] Rodstein J, McElfresh J S, Barbour J D, *et al.* Identification and synthesis of a female-produced sex pheromone for the cerambycid beetle *Prionus californicus*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2009, 35(5): 590-600.
- [69] Rodstein J, Millar J G, Barbour J D, *et al.* Determination of the relative and absolute configurations of the female-produced sex pheromone of the cerambycid beetle *Prionus californicus*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2011, 37(1): 114-124.
- [70] Barbour J D, Cervantes D E, Lacey E S., *et al.* Calling behavior in the primitive longhorned beetle *Prionus californicus* Mots[J]. Journal of Insect Behavior, 2006, 19(5): 623-629.

- [71] Agnello A M, Loizos L, Gilrein D. A new pheromone for *Prionus* root-boring beetles[J]. NY Fruit Quart, 2011, 19(2): 17-19.
- [72] Barbour J D, Millar J G, Rodstein J, *et al.* Synthetic 3, 5-dimethyldecanoic acid serves as a general attractant for multiple species of *Prionus* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2011, 104(3): 588-593.
- [73] Löbl I, Smetana A. Catalogue of the Palaearctic coleopteran[M]. Vol.6: Chrysomeloidea, Apollo Books, Stenstrup, Demark, 2010.
- [74] Ray A M, Barbour J D, McElfresh J S, *et al.* 2, 3-Hexanediols as sex attractants and a female-produced sex pheromone for cerambycid beetles in the *Prionine* genus *Tragosoma*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2012, 38(9): 1151-1158.
- [75] Ray A M, Arnold R A, Swift I, *et al.* (R)-desmolactone is a sex pheromone or sex attractant for the endangered valley elderberry long-horn beetle *Desmocerus californicus* dimorphus and several congeners (Cerambycidae: Lepturinae)[J]. Plos One, 2014, 9(12): e115498.
- [76] Ray A M, Swift I P, McElfresh J S, *et al.* (R)-desmolactone, A female-produced sex pheromone component of the cerambycid beetle *Desmocerus californicus* californicus (subfamily Lepturinae)[J]. Journal of Chemical Ecology, 2012, 38(2): 157-167.
- [77] Maki E C, Rodstein J, Millar J G, *et al.* Synthesis and field tests of possible minor components of the sex pheromone of *Prionus californicus*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2011, 37(7): 714-716.
- [78] Fukaya M, Yasuda T, Wakamura S, *et al.* Reproductive biology of the yellow-spotted longicorn beetle, *Psacotha hilaris* (Pascoe) (Coleoptera: Cerambycidae). Identification of contact sex pheromone on female body surface[J]. Journal of Chemical Ecology, 1996, 22(2): 259-270.
- [79] Pajares J A, Álvarez G, Hall D R, *et al.* 2-(Undecyloxy)-ethanol is a major component of the male-produced aggregation pheromone of *Monochamus sutor*[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2013, 149(2): 118-127.
- [80] 王广利, 迟德富. 天牛化学通讯及其在害虫综合治理中的应用[J]. 林业科学, 2007, 43(9): 88-95.
- [81] 马涛, 温秀军, 李兴文. 昆虫性信息素人工合成技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(6): 46-51.
- [82] Wickham J D, Harrison R D, Lu W, *et al.* Generic lures attract cerambycid beetles in a tropical montane rain forest in southern china[J]. Journal of Economic Entomology, 2014, 107(1): 259-267.
- [83] Macias-Samano J E, David W, Millar J G, *et al.* 2-undecyloxy-1-ethanol in combination with other semiochemicals attracts three *Monochamus* species (Coleoptera: Cerambycidae) in British columbia, Canada[J]. Canadian Entomologist, 2012, 144(6): 764-768.

## Research on the Pheromone Compounds of Cerambycidae Insects

ZHU Ying<sup>1</sup>, HUANG Zhi-jia<sup>1</sup>, LAN Lai-jiao<sup>1</sup>, ZHANG Jin-kun<sup>1</sup>, GAO Qing-yuan<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>2</sup>,  
LI Yong-hu<sup>2</sup>, WEN Xiu-jun<sup>1</sup>, MA Tao<sup>1</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. Pherobio Technology Co., Ltd, Beijing 101102, China)

**Abstract:** The identification and application of insect pheromone compounds play an important role in integrated pest management (IPM). Pheromone compounds are now identified from more than 100 species belonging to Cerambycidae. The pheromones identified to date from species in the subfamilies Cerambycinae, Spondylidinae, and Lamiinae are all male aggregation pheromones, whereas all known examples for species in the subfamilies Prioninae and Lepturinae are female sex pheromones. These pheromone components have a high overlapping ratio among the subfamilies, especially among the genera and the species. The same components can play a role in many species of Cerambycidae. The application potential and broad prospects of pheromone compounds regulating insect behavioral activities in pest management have made the research of pheromone compounds more important. To make a systematic analysis on the known pheromone components of Cerambycidae can provide evidence for the further identification of the pheromone components of other Cerambycidae species, and promote the identification and application of pheromone components in Cerambycidae.

**Keywords:** Cerambycidae; pheromone compounds; IPM