信息素促进凹唇壁蜂访花提高苹果座果率和果实品质*

王丽娜[1, 2**] 闫 卓[2] 欧阳芳[2] 肖云丽[3] 曲诚怀[4] 叶保华[1] 门兴元[5***]

（1. 山东农业大学，植物保护学院，泰安 271018；2. 中国科学院动物研究所，农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室，北京 100101；3. 山东省植物保护总站，济南 250100；4. 烟台市牟平区农业技术推广中心，烟台 264100；5. 山东省农业科学院植物保护研究所，济南 250100）

摘 要 **【目的】** 凹唇壁蜂 *Osmia excavata* Alfken 是我国北方早春重要的果树传粉昆虫之一，但是其访花活动容易受到早春低温等不良天气的影响。为应对低温等不良天气，研究信息素（蜜蜂活动增强剂）对凹唇壁蜂活动规律、苹果树花朵座果率以及果实产量的影响具有重要意义。**【方法】** 测定苹果树在释放信息素与不释放信息素的条件下，凹唇壁蜂的访花活动规律、花朵座果率及果实产量等数据。**【结果】** 苹果对凹唇壁蜂授粉的依赖程度为 0.95。释放信息素区域的凹唇壁蜂访花效率是对照的 1.34 倍，显著提高苹果的座果率，增加程度为 12%；增加平均单果重 3.53 g；显著提高 0.15 mg/100 g 的维生素 C 含量。**【结论】** 在低温等不良环境条件下，可以通过释放信息素等人工管理措施，提高授粉昆虫对作物的访花效率，进而改善作物品质，提高作物产量，减少损失。

关键词 信息素，苹果，凹唇壁蜂，授粉效率，座果率，品质

Releasing *Osmia excavata* Alfken pheromones increases pollination activity and improves fruit set and quality

WANG Li-Na[1, 2**] YAN Zhuo[2] OUYANG-Fang[2] XIAO Yun-Li[3]
QU Cheng-Huai[4] YE Bao-Hua[1] MEN Xing-Yuan[5***]

(1. Deparement of Plant Protection, Shandong Agriculture University, Taian 271018, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Shandong Plant Protection Station, Jinan 250100, China; 4. Muping Agricultural Technology Service and Extention Center, Yantai 264100, China; 5. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the effect of releasing a pheromone (Bee activity enhancer) to overcome the effects of adverse weather conditions on the pollination efficiency of *Osmia excavata* Alfken, one of the most important pollinators in northern China. **[Methods]** We compared *O. excavata* activity levels, fruit set and fruit yield at sites where the pheromone was released to that at sites where it was not released. **[Results]** The dependence of apples on *O. excavata* for pollination was 0.95. The flower-visiting efficiency of bees in pheromone treated orchards was 1.34 times higher than in control orchards, and releasing pheromone significantly increased the fruit set of apples. Releasing pheromone also increased mean apple weight by 3.53 g, and improved fruit quality by increasing the content of vitamin C by about 0.15 mg/100 g. **[Conclusion]** Releasing pheromone in apple orchards can counteract the adverse effects of low temperature by increasing the frequency at which *O. excavata* visits flowers, thereby improving fruit quality, raising fruit yield and reducing fruit loss.

Key words pheromone, apple, *Osmia excavata*, pollination efficiency, fruit set, fruit quality

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2016YFC0503402）；农业农村部农业示范项目-蜜蜂授粉与绿色防控技术集成与推广（2130106）

**第一作者 First author，E-mail：linawang@sdau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：menxy2000@hotmail.com

收稿日期 Received：2018-10-21，接受日期 Accepted：2018-11-12

苹果广泛分布在全球 80 多个国家和地区，其中中国的种植面积和产量位居世界第一位（陈学森等，2010）。苹果树属异花授粉果树，配子体自交不亲和，自花坐果率低（*Knox et al.*，1972；张雪梅等，2009），其生产高度依赖于昆虫授粉（Klein *et al.*，2007），因此高质量的授粉过程是苹果高产的必要保证。

在苹果栽培过程中，选择合适的授粉昆虫对主栽品种产量和质量均有重要影响。凹唇壁蜂作为重要授粉昆虫之一，在山东省等苹果主产区得到广泛使用。其访花速度快、活动起始温度低、授粉能力强，在访花过程中可增加苹果单果重量，提高坐果率、果品产量和质量，端正果型（袁锋等，1992）。凹唇壁蜂作为一种果园内半驯化的野生传粉昆虫，与苹果树之间形成良好的互作关系。但近几年早春低温等不良天气的发生（李军民，2013；周军伟，2014），导致壁蜂的授粉活动受到影响，果树授粉受精不良，进而对果实的产量和质量产生了巨大的影响。信息素已被成功应用于油茶、草莓和蓝莓等作物，可以提高产量，减少畸形率（张叶根等，2015；刘震等，2016；刘美见等，2016），但有关信息素如何影响凹唇壁蜂访花频率，进而影响苹果座果率和果实品质，目前没有相关报道。

本试验拟通过人工释放信息素，研究其对壁蜂的采集飞行活动的影响，调查与比较在释放信息素条件下壁蜂对苹果的授粉效率和座果率的作用，并测定与比较果实产量和品质，旨在通过增强人工管理，确保苹果的授粉受精，减少损失。

1　材料与方法

1.1　实验基地概况

试验区域位于山东省烟台市牟平区丰坤果蔬合作社（37°29′25″N，121°55′56″E），授粉作物为苹果，主栽品种为红富士，树龄 6 年，东西行，株距 2 m、行距 4 m，其间种植嘎拉品种作为授粉树。苹果种植量为 70 株/667 m^2 左右，基地管理按照标准种植。地势较为平坦，土质为砂质土壤。

1.2　信息素释放及壁蜂管理

试验所用信息素由山东省植保总站提供，其外形为长条状，长 200 mm，宽 4.2 mm，直径 2.5 mm，两端密封，内置工蜂信息素和植物香氛，主要成分为萜类衍生物，通过高分子缓释装置向外。花期前将信息素按 66 根/667 m^2 悬挂于树高 2/3 处。在苹果始花期前 3 d 在对照区悬挂信息素，缓冲隔离区从中间分开，一侧为对照区，另一侧为悬挂信息素释放区。

壁蜂来源于山东烟台丰坤果蔬合作社上一年的自留壁蜂（自繁年），于 2017 年 4 月 18 日苹果初花期进行放蜂。壁蜂宜于苹果开花前 4-5 d 进行释放，100 头/667 m^2。蜂箱应离开地面、坐北向南，用塑料薄膜遮盖，营造一个向阳、背风的环境，放蜂期间保证蜂箱前要有湿泥，便于壁蜂采泥筑巢。果树落花后需回收巢管，将其吊挂在通风、通气、无污染的房间下常温保存。春节后剖管剥出蜂茧放在 4 ℃下保存。烟碱类农药是降低蜜蜂等授粉昆虫多样性的重要因子，而壁蜂对烟碱类农药也尤为敏感，为保护壁蜂，放蜂前 10 d 内至花期不得喷洒农药。

1.3　试验设计

在该果园内选择长势、树型、开花时期基本一致的苹果作为试验材料，其中试验区总面积 1.93 hm^2，分别设置对照区（未释放信息素）、信息素释放区以及两区之间设定的缓冲隔离区。其中试验区面积约为 0.642 hm^2，对照区面积 0.643 hm^2，试验区进行人工释放壁蜂，设置信息素 66 根/667 m^2，对照区只进行人工放蜂，无信息素处理。试验区与对照区直线距离至少 50 m。

（1）信息素对壁蜂访花活动，苹果座果率和果实品质的影响试验：在对照区、信息素释放区以及缓冲隔离区同时进行，试验设置信息素处理、苹果品种（红富士、嘎啦）2 个因素，共 4 个组合处理，每个处理 8 个重复。其中处理区和对照区各取样调查 16 株苹果树，每株树分别调查东西南北 4 个方向枝条的花朵座果率、单位时间（5 min 内）有效访花壁蜂的数量、苹果果实

品质等指标，综合评价信息素对壁蜂和苹果的作用效果。

（2）苹果花对壁蜂授粉依赖程度的测定试验：在对照区、信息素释放区共设置 10 个富士品种的枝条用纱网进行网罩处理，分别调查其花朵座果率、果实品质等方面的指标。可以通过对比在对照区和信息素释放区的各项指标，定量评估苹果树对昆虫授粉的依赖性程度，两者差距越大说明苹果树对昆虫授粉的依赖性越大。

1.4 试验调查

1.4.1 单位时间（**5 min** 内）苹果树上访花传粉者数量调查

（1）在盛花期（2017 年 4 月 22 日、4 月 23 日及 4 月 24 日）分别调查对照区、信息素释放区单位时间（5 min 内），红富士苹果树上壁蜂及其他传粉昆虫数量。每个区域重复调查 8 株树。

（2）在盛花期（2017 年 4 月 22 日、4 月 23 日及 4 月 24 日）分别调查对照区、信息素释放区单位时间（5 min 内），嘎啦苹果树上壁蜂及其他传粉昆虫数量。每个区域重复调查 8 株树。

（3）连续 4 d 监测对照区、信息素释放区单位时间（5 min 内）从 6：00 至 17:30 壁蜂的活动规律。

（4）访花频率：单位时间内有效访花壁蜂的数量。本文采用访花频率来定量分析壁蜂的访花活动。

1.4.2 座果率调查 花朵座果率：果树开花后，果树所结出果实的数量占全树总花朵数量的百分数。

花序座果率：果树开花后，果树所结出果实的花序数量占全树总花序数量的百分数。

（1）在盛花期分别调查对照区和信息素释放区，选定红富士苹果树东西南北四个方向枝条上的花朵数。在苹果落花座果后，再次调查选定红富士苹果树东西南北四个方向枝条花朵座果数，每个区域重复调查 8 棵树。

（2）在盛花期分别调查对照区和信息素释放区，调查选定嘎啦苹果树东西南北四个方向枝条上花朵数。在苹果落花座果后，再次调查选定嘎啦苹果树东西南北四个方向枝条花朵座果数，每个区域重复调查 8 棵树。

1.4.3 苹果果实品质测定 品质指标：总糖（%）、总酸（%）、维生素 C 含量（mg/100 g）、硬度（kg/cm^2）。

1.4.4 苹果果实果形指数测定 果形指数指标：横径（mm）、纵径（mm）、单果重（g）。

1.4.5 苹果对凹唇壁蜂授粉的依赖程度

$$D=(Y_0-Y_c)/Y_0,$$

$$Y_0=(N_0/T_0)\times W_0,$$

$$Y_c=(N_c/T_c)\times Wc。$$

式中：D：苹果对凹唇壁蜂授粉的依赖程度；Y_0：开放授粉区苹果的产量；Y_c：网罩区的苹果产量；N_0：开放授粉区苹果座果花序数；W_0：开放授粉区苹果平均单果重；T_0：开放授粉区苹果总花序数；N_c：网罩区苹果座果花序数；W_c：网罩区苹果平均单果重；T_c：网罩区苹果总花序数。

1.5 数据分析

试验数据采用 SPSS 20.0 统计软件一般线性模型和单因素方差分析法进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 凹唇壁蜂对苹果座果率的作用效果

通过对网罩处理区、对照区和信息素处理区的苹果花朵座果率调查，结果见表 1，由表 1 可知，使用信息素处理的试验区红富士的花朵座果率达到 87%，花序座果率达到 93%；而对照未使用信息区的红富士的花朵座果率为 75%，花序座果率为 93%；且没有任何传粉昆虫可进入的笼罩区的红富士的花朵座果率只有 7%，花序座果率为 28%。其中开放区域（信息素处理区和对照区）较网罩区红富士花朵座果率可以提升 74%，开放区域较网罩区花序座果率可以提升 65%；信息素处理区较网罩区红富士花朵座果率可以提升 12%。

2.2 信息素对凹唇壁蜂访花活动的影响

对壁蜂在单位时间（5 min 内）苹果树上有效访花（壁蜂腹部接触到柱头）传粉者数量调查

表 1　不同处理条件下红富士的花朵座果率和花序座果率
Table 1　Inflorescences fruit set and flowers fruit set under different treatments

处理 Treatment	花朵座果率 Inflorescences fruit set	花序座果率 Flowers fruit set
网罩（无壁蜂）Cage	0.07±0.02 A	0.28±0.06 a
对照（壁蜂）Control	0.75±0.03 B	0.93±0.02 b
信息素（壁蜂+信息素）Pheromone	0.87±0.02 C	0.93±0.02 b

表中数据为均值±标准误，数字后标有不同大写字母代表花朵座果率在 $P<0.01$ 水平差异极显著，不同小写字母代表座果率在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Data in the table are mean±SE, and followed by different capital letters in the same column indicate the results of the inflorescences fruit set at $P<0.01$ level of extremely significant difference, while followed by different small letters in the same column indicate the results of the flowers fruit set at $P<0.05$ level of significant difference.

结果表明：大量有效样本条件下（观察壁蜂个体数量为 64 头），对照区和信息素释放区在不同时间段内单棵树访花壁蜂数量分布结果显示：同一时间段内信息素释放区单位时间内苹果树上访花壁蜂数量始终高于对照区（图 1：A）。从图 1（B）可以看出，释放信息素区域的凹唇壁蜂访花频率（3.59 只/min）显著高于对照区域（2.68 只/min）（$P<0.05$），信息素处理的凹唇壁蜂访花效率是对照的 1.34 倍。

2.3　信息素对苹果座果率的影响

从图 2 可以看出，信息素处理区红富士苹果的花朵座果率显著高于对照区红富士苹果的花朵座果率 12%（$F = 8.03$，$df=59$，$P<0.01$）。而对信息素处理区和对照区嘎拉苹果的花朵座果率均低于 90%，无显著差异。

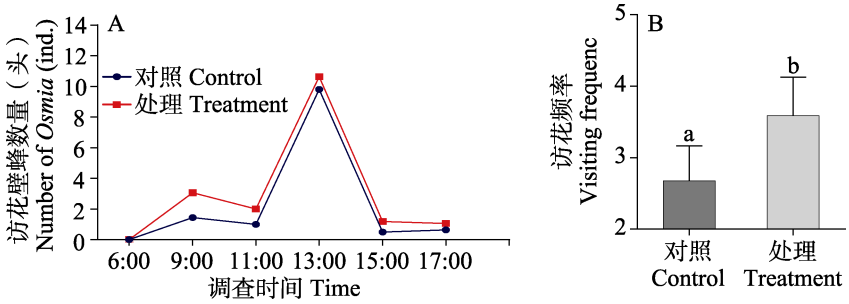

图 1　凹唇壁蜂访花活动
Fig. 1　Flowering activity of *Osmia excavata*

A. 不同时间段内壁蜂的活动规律；B. 对照区和处理区壁蜂的访花频率。
图中数据为平均值±标准误，柱上标有不同小写字母表示 5%水平差异显著。
A. Activity regularity of *O. excavta* in different time; B. Visiting frequency beween control and treatment areas.
Data are mean±SE. Histograms with different small letters indicate the visiting frequence at $P<0.05$ level of significant difference.

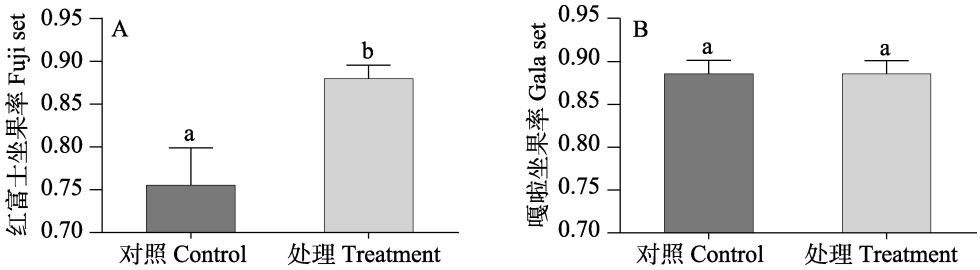

图 2　苹果座果率
Fig. 2　Apple inflorescences fruit set

A. 对照区和处理区红富士的座果率；B. 对照区和处理区嘎啦的座果率。
A. Fuji apple Inflorescences fruit set in control and treatment areas; B. Gala apple inflorescences fruit set in control and treatment areas.
图中数据为平均值±标准误，不同小写字母表示 1%水平差异显著。下图同。
Data are mean±SE. Histograms with the small letters indicate the visiting frequence at $P<0.01$ level of significant difference. The same below.

2.4 信息素对苹果品质的影响

2.4.1 信息素对红富士苹果品质的影响 信息素对红富士苹果维生素 C、可溶性糖、总酸和硬度的影响见图 3。信息素处理区的维生素 C 含量显著高于对照区 0.15 mg/100 g（$F = 7.69$，df=58，P<0.01）。但可溶性糖（$F = 0.085$, $df = 58$，$P > 0.05$）、总酸（$F = 0.90$，$df = 58$，P>0.05）和硬度（$F = 4.80$，$df = 58$，$P > 0.05$）在信息素处理区和对照区中差异不显著。

2.4.2 信息素对苹果单果重、横径和纵径的影响 信息素处理区和对照区的红富士苹果的果实横径（$F = 0.10$，$df = 176$，$P > 0.05$）、纵径（$F = 0.21$，$df = 176$，$P > 0.05$）以及单果重（$F = 0.16$，$df = 176$，$P > 0.05$）均无显著差异。

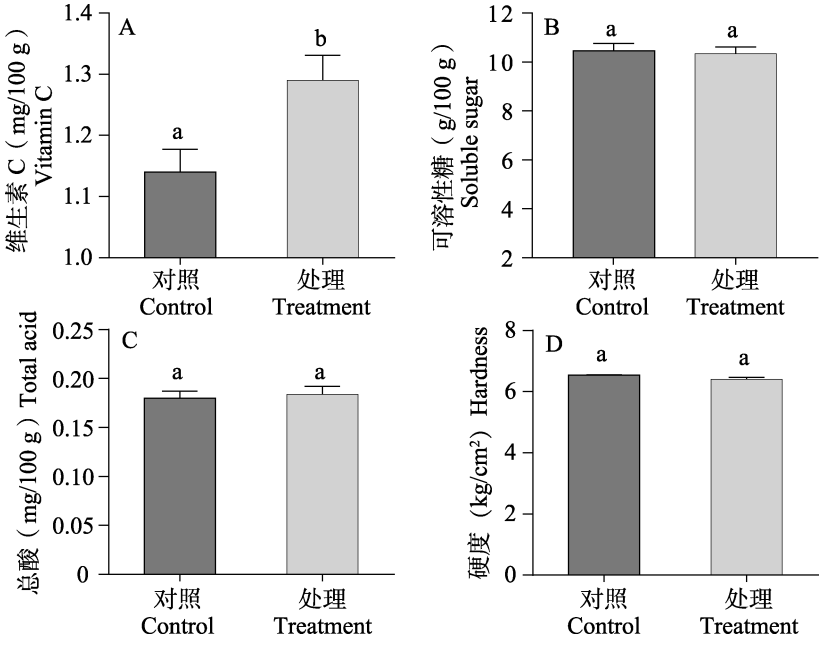

图 3 信息素对红富士苹果品质的影响

Fig. 3 Effect of pheromone on quality of Fuji apple

A. 对照区和处理区红富士维生素 C 含量；B. 对照区和处理区红富士可溶性糖含量；C. 对照区和处理区红富士总酸含量；D. 对照区和处理区红富士硬度含量。

A. Vitamin C of Fuji apple in control and treatment areas; B. Soluble sugar of Fuji apple in control and treatment areas; C. Total acid of Fuji apple in control and treatment areas; D. Hardness of Fuji apple in control and treatment areas.

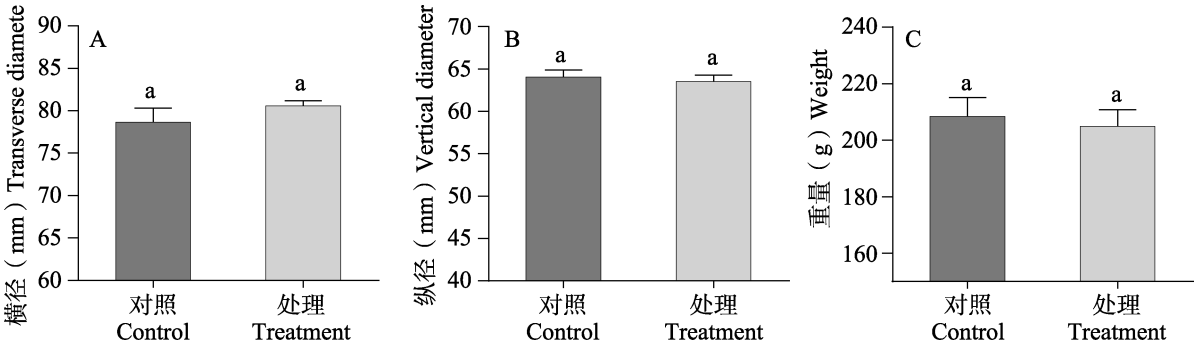

图 4 信息素对对富士苹果单果重、横径和纵径的影响

Fig. 4 Effect of pheromone on Fuji apple fruit weight, transverse diameter and vertical diameter

A. 对照区和处理区红富士的果实横径；B. 对照区和处理区红富士的果实纵径；C. 对照区和处理区红富士的单果重。

A. Transverse diameter of Fuji apple in control and treatment areas; B. Vertical diameter of Fuji apple in control and treatment areas; C. Weight of Fuji apple in control and treatment areas.

2.4.3　罩网条件下苹果的果形指数和果实品质

网罩区和开放区的红富士苹果的果实横径（$F = 0.70$，df=201，$P > 0.05$）、纵径（$F = 0.36$，df=201，$P > 0.05$）以及单果重（$F = 0.71$，df=201，$P > 0.05$）均无显著差异。信息素处理区的平均单果重高于对照区平均单果重 3.53 g，高于网罩区平均单果重 15.66 g（表 2）。

表 2　罩网和开放条件下苹果的果形指数

Table 2　The shape index of apple

处理 Treatment	单果重（g） Weight	横径（mm） Transverse diameter	纵径（mm） Vertical diameter
网罩（无壁蜂） Cage	192.83±10.71 a	78.58±1.69 a	64.92±1.39 a
对照（壁蜂） Control	204.96±5.80 a	80.31±0.75 a	63.54±0.74 a
信息素（壁蜂+信息素） Pheromone	208.49±6.65 a	80.69±0.91 a	64.06±0.84 a

表中数据为均值±标准误，数字后标有相同字母代表在 $P < 0.05$ 水平无显著差异。

Data in the table are mean±SE, and followed by same letters in the same column indicate no significant difference at $P < 0.05$ level.

3　讨论

苹果树作为一种异花授粉植物，在大面积种植条件下，自然授粉昆虫相对缺乏，造成苹果座果率很低。因此苹果园都需要人工释放授粉昆虫。最简便廉价的方式是采用壁蜂辅助授粉来提高座果率。凹唇壁蜂作为我国北方重要的果树传粉昆虫，能够显著提高苹果的花朵坐果率和花序座果率（袁峰等，1992；何志伟等，2009）。本试验通过对开放区和网罩区苹果的产量进行评估：田间试验开放区苹果产量为 194.27 g，网罩区苹果产量为 9.32 g，定量得出苹果对壁蜂的依赖程度为 0.95，符合 Alexandra Klein 对苹果的高产极度依赖昆虫授粉这一结论（Klein *et al.*，2007）。

苹果座果率高低与异花授粉效率存在直接关系。而壁蜂数量及有效访花效率是完成异花授粉的保障。通过调查信息素处理区和对照区 5 d 内不同时间段的壁蜂访花数量可知，不同时间段壁蜂的访花数量和活动规律存在差异，其主要原因可能受温度等因素的影响。但 5 d 内 6 个时间段信息素释放区的有效访花壁蜂数量均高于对照区，信息素区壁蜂访花效率显著高于对照区，说明悬挂信息素能够增强壁蜂的采集飞行能力，显著增加壁蜂的访花频率。因此，在苹果开花时期，遇到低温等不良条件下，通过人工释放昆虫活动信息素来增强壁蜂访花活动，从而来促进对苹果的授粉过程。

本试验结果表明，信息素的使用能够显著提高红富士的花朵座果率，但是对花序座果率的提高不显著。推测原因可能是由于信息素的释放直接作用于壁蜂，提高了壁蜂的访花效率，进而提高了红富士的花朵座果率。同时，由于信息素处理区和对照区的壁蜂释放数量可能已接近最大放蜂量，趋于饱和，导致对花序座果率的提高不显著。信息素的使用对嘎啦的花朵座果率和花序座果率均没有显著提高。这可能是由于嘎啦作为授粉树开花较早，其开花盛期与壁蜂的访花活动高峰期没有完全吻合。

信息素对红富士的维生素 C 提高极显著，对可溶性糖、总酸和硬度的提高不显著。推测原因可能是因为信息素的释放增加了壁蜂的访花数量，保障了授粉的均匀性，进而提高了果实品质。信息素对苹果单果重、横径和纵径的影响也不显著。苹果的果实品质一方面取决于充分的授粉受精，另一方面也取决于树势、水分、土壤肥力等因素的影响。

网罩区和开放区的红富士苹果的果实横径、纵径以及单果重均无显著差异，但开放区的红富士果实硬度显著高于网罩区。这与袁峰等（1992）的结论不完全一致，推测原因可能是由于考虑到网罩会对苹果的产量造成影响，所以设置网罩处理的重复数较开放区的重复数少，分析起来会对结果造成一定的影响。虽然信息素处理区的平均单果重与网罩区差异不显著，但信息素处理区的平均单果重比网罩区平均单果重高出 15.66 g。

工蜂信息素是蜜蜂气味的主要组成部分，可

以在采食过程中释放信息素，引导其他蜂前来采集蜜粉（Free and Williams，1970），同时商品化的信息素（商品名为蜂香 Bee scent）在国内外已得到广泛应用。昆虫活动信息素应用于油茶、蓝莓等作物可以提高其产量（刘震等，2016；刘美见等，2016）；应用于草莓可以提高蜜蜂授粉效率（Pardo and Nates，1994）减少果实畸形率（张叶根等，2015）；应用于瓜类作物可以增加座果率，统一成熟期（高景林和赵东香，2014）。本文试验结果表明，信息素可通过增强凹唇壁蜂的访花效率，进而提高苹果的座果率，增加果实产量，改善果实品质。在低温等不良环境条件下，可以通过人工管理措施（如释放信息素等），提高授粉昆虫对作物的访花效率，进而改善作物品质，提高作物产量，减少损失。

本文在分析信息素对苹果座果率的影响时，同时考虑了对花朵座果率及花序座果率。而在定量评估苹果对凹唇壁蜂的依赖程度时，采用了花序座果率定量评估了处理区和对照区的产量，以保证计算过程中的准确性。我们认为花朵座果率是花序座果率的必要保障，花序座果率又是苹果高产的保障，在低温等不良环境条件下，信息素的释放不仅是花朵座果率的保障也是花序座果率的必要保障。但过高的花朵座果率会给后期的人工疏果带来巨大的工作量，同时也会增加成本。国内现还没有针对最适放蜂量的系统研究，所以定量评估果园的最适放蜂量便显得尤为重要。

参考文献 (References)

Chen XS, Han MY, Su GL, Liu FZ, Guo GN, Jiang YM, Mao ZQ, Peng FT, Shu HR, 2010. Development trend of apple industry in today's world and suggestions for high quality and efficient development of apple industry in China. *Journal of Fruit Science*, 27(4): 598–604. [陈学森, 韩明玉, 苏桂林, 刘凤之, 过国南, 姜远茂, 毛志泉, 彭福田, 束怀瑞, 2010. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见. 果树学报, 27(4): 598–604.]

Di Prisco G, Cavaliere V, Annoscia D, Varricchio P, Caprio E, Nazzi F, Gargiulo G, Pennacchio F, 2013. Neonicotinoid clothianidin adversely affects insect immunity and promotes replication of a viral pathogen in honey bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(46): 18466–18471.

Free JB, Williams IH, 1970. Exposure of the Nasonov gland by honeybees (*Apis mellifera*) collecting water. *Behaviour*, 37(3): 286–290.

Gao JL, Zhao DX, 2014. The bee hive's pheromone were reviewed. *Apiculture of China*, 65(13): 19–22. [高景林, 赵冬香, 2014. 蜜蜂工蜂纳氏信息素研究进展. 中国蜂业, 65(13): 19–22.]

He ZW, Zhou WR, 2009. Study on the pollination of apple by the *Osmia excavata*, *Apis mellifera* and artificial pollination. *Apiculture of China*, 60(11): 9–11, 15. [何伟志, 周伟儒, 2009. 凹唇壁蜂、意大利蜜蜂与人工授粉对苹果授粉效果研究. 中国蜂业, 60(11): 9–11, 15.]

Klein AM, Vaissiere BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T, 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 274(1608): 303–313.

Knox RB, Willing RR, Anne EA, 1972. Role of pollen-wall proteins as recognition substances in interspecific incompatibility in poplars. *Nature*, 237(5355): 381–383.

Li JM, 2013. The Main natural disasters of Luochuan apple in Shaanxi province and status of disaster prevention and mitigation system. *Fruiter Technology and Information*, 2013(10): 33–35. [李军民, 2013. 陕西洛川苹果主要自然灾害及防灾减灾体系现状. 果树实用技术与信息, 2013(10): 33–35.]

Liu JM, Wang YH, Zhang L, Xiao C, Zhang ZR, 2016. Effect of honeybee activity enhancer on blueberry crops. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(4): 59–60. [刘美见, 王英华, 张丽, 肖春, 张照然, 2016. 蜜蜂活动增强剂保丽蕊在蓝莓作物上的应用效果. 安徽农业科学, 44(4): 59–60.]

Liu Z, Liu W, Hu LB, Bo CQ, 2016. Effects of polynate on bee activities, camellia fruit rate and fruit yield. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(2): 76–79, 82. [刘震, 刘伟, 胡林波, 柏承权, 2016. 保丽蕊对蜜蜂活动及油茶座果率、果实产量的影响. 湖南农业科学, 2016(2): 76–79, 82.]

Pardo PR, Nates PG, 1994. Increasing flower visits by *Apis mellifera* L. (Hymenoptera: Apidae) in crops by the use of synthetic Nasonov pheromone. *Revista Colombiana de Entomologia*, 20(3): 187–192.

Yuan F, Wei YP, Zhang YL, Huang SZ, Yuan JG, 1992. Study on the pollination effect of osmia on apple. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1992(3): 93–96. [袁锋, 魏永平, 张雅林, 黄尚志, 袁积股, 1992. 苹果壁蜂授粉效果的研究. 西北农业学报, 1992(3): 93–96.]

Zhou JW, 2014. Research on the design of apple's cold weather damage weather index insurance product. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [周军伟, 2014. 苹果低温冻害气象指数保险产品设计研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]

Zhang YG, Tan HY, Deng SC, Zhou YY, Tong YF, 2015. Effects of polynate on the number of pollination and malformation rate of strawberry in low temperature. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2015(11): 49–50. [张叶根, 谭虹宇, 邓士昌, 周洋洋, 童英富, 2015. 气温较低时保丽蕊对蜜蜂访花数及草莓畸形率的影响. 中国园艺文摘, 2015(11): 49–50.]