稻纵卷叶螟成虫对植物挥发物的触角电位反应*

位 博[1,2**] 高慧颖[1,2] 郑许松[2] 徐红星[2]
阮永明[1] 吕仲贤[1,2] 朱平阳[1***]

（1. 浙江师范大学化学与生命科学学院，金华 321004；
2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所，杭州 310021）

摘 要 【**目的**】研究稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 成虫对 8 种不同浓度植物挥发物的触角电位反应，为研制高效稻纵卷叶螟两性引诱剂奠定理论基础。【**方法**】采用触角电位 Electroantennogram (EAG) 技术测定稻纵卷叶螟未交配雌蛾和雄蛾取食蜂蜜水、未交配雌蛾和雄蛾取食清水，以及已交配雌蛾和雄蛾取食蜂蜜水后对苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇、1-庚醇、己醛、水杨酸甲酯、顺-3-己烯醛和乙酸苯甲酯 8 种不同浓度植物挥发物的触角电位反应。【**结果**】稻纵卷叶螟雄蛾对植物挥发物的触角电位反应值高于雌蛾，未交配的雌蛾和雄蛾对植物挥发物的触角电位反应值高于已交配雌蛾和雄蛾；取食蜂蜜水未交配的雌蛾和雄蛾对植物挥发物的触角电位反应值高于取食清水未交配的雌蛾和雄蛾的。取食蜂蜜水未交配雄蛾和取食清水未交配雌蛾和雄蛾在己醛 500 g/L 浓度时 EAG 反应值最大，取食蜂蜜水已交配雌蛾和取食蜂蜜水未交配雄蛾在己醛 100 g/L 浓度时 EAG 反应值最大，取食蜂蜜水已交配雄蛾在苯乙醛 500 g/L 浓度时 EAG 反应值最大。【**结论**】8 种不同浓度植物挥发物都能引起不同生理状态稻纵卷叶螟的触角电位反应。稻纵卷叶螟成虫对同种植物挥发物不同浓度的敏感度不同，性别、交配前后和不同取食的稻纵卷叶螟成虫对不同浓度植物挥发物的敏感度也不同。稻纵卷叶螟成虫对己醛反应灵敏，低浓度己醛能引起稻纵卷叶螟反应；苯乙醛能引起未交配的稻纵卷叶螟雌、雄蛾的强烈反应。

关键词 稻纵卷叶螟；生理状态；植物挥发物；浓度；EAG 反应

EAG responses of adult *Cnaphalocrocis medinalis* to plant volatiles

WEI Bo[1,2**] GAO Hui-Ying[1,2] ZHENG Xu-Song[2] XU Hong-Xing[2]
RUAN Yong-Ming[1] LÜ Zhong-Xian[1,2] ZHU Ping-Yang[1***]

(1. College of Chemistry and Life Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;
2. Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agriculture Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the electroantennogram (EAG) responses of adult *Cnaphalocrocis medinalis* to 8 plant volatiles in order to develop efficient attractants for this species. **[Methods]** The EAG responses of adult *C. medinalis* moths to different concentrations of the plant volatiles benzaldehyde, phenylacetaldehyde, linalool, heptanol, hexanal, methyl salicylate, cis-3-hexenal and benzyl acetate, were measured in both sexes, in mated and unmated individuals and in individuals feeding on honey-water and those feeding on water. **[Results]** The EAG responses of males to plant volatiles were stronger than those of females and unmated females and males were more responsive to plant volatiles than mated moths. Unmated females and males provided with honey water were more responsive to plant volatiles than those provided with only water. 500 g/L hexanal elicited the strongest EAG responses from unmated male moths provided with ether honey-water or water. However, 100 g/L hexanal elicited the strongest EAG responses from mated female and unmated male moths provided with

*资助项目 Supported projects：浙江省“领雁”计划项目（2022C02047）；国家水稻产业技术体系项目（CARS-01-36）；浙江师范大学“双龙学者”科研启动经费（YS304021920）

**第一作者 First author，E-mail：weibo360123@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：zpy85@163.com

收稿日期 Received：2022-06-09；接受日期 Accepted：2022-08-19

honey-water. 500 g/μL phenylacetaldehyde elicited the strongest EAG responses in mated male moths feeding on honey water. **[Conclusion]** EAG responses of *C. medinalis* to eight different plant volatile varied with the concentration of the volatile in question, with the sex of the moth, its mating status and whether it was feeding on honey-water or water. *C. medinalis* is most sensitive to hexanal but phenylacetaldehyde can also induce strong EAG responses from unmated female and male moths.

Key words *Cnaphalocrocis medinalis*; physiological state; plant volatile; concentration; EAG response

稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee 是危害水稻的主要迁飞性害虫之一，其幼虫主要将水稻叶片纵向包裹并在其中刮食，导致水稻叶片出现白斑，影响光合速率，引起产量损失（Wang *et al.*，2011）。因其寄主植物种类多、发生期受环境及气候影响大，加上近年来水稻耕作制度的改变及过渡使用化学农药等因素，导致稻纵卷叶螟连年暴发（Zhao *et al.*，2016；包云轩等，2019）。近年来，在国家绿色生态可持续农业的政策引导以及防控技术的不断迭代更新下，农作物病虫害绿色防控技术已成为稻纵卷叶螟防控的重要防控手段（赵景等，2022）。我国水稻害虫绿色防控技术可归纳为降低害虫种群基数、营建农田生物多样性技术、保育和释放天敌技术、理化诱控技术以及科学用药技术 5 个方面（徐红星等，2017）。

昆虫通过植物释放的挥发性物质进行寄主定位、取食、交配和产卵等行为，通过研制植物挥发物进行害虫的有效防控是生态调控主要措施之一（von Arx *et al.*，2011；Gharaei *et al.*，2020）。有研究表明，花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* Fairmaire 雌虫和雄虫对浓度为 1×10^{-5} mg/mg 的顺-3-己烯醇有显著 EAG 反应，对其有诱导交配和产卵的作用，而植物倍半萜反式-β-石竹烯对其有趋避的作用（Ren *et al.*，2017）。桃小食心虫 *Carposina niponensis* Walsingham 雌成虫对苹果果实的挥发物正壬醛、α-法尼烯和十四烷化合物有显著的 EAG 反应（刘柳等，2022）。已交配美国白蛾 *Hyphantria cunea* Drury 雌蛾对 β-水芹烯、β-蒎烯、3-蒈烯、1,3-二甲基苯、1,4-二甲基苯、对异丙基甲苯、3-乙基苯乙酮和 4-乙基苯乙酮的 EAG 相对反应值比未交配雌蛾的 EAG 相对反应值高，这些挥发物可能具有诱导美国白蛾的雌蛾产卵的作用（马庆辉等，2021）。茶黑毒蛾 *Dasychira baibarana* Matsμmura 雄蛾对(Z)-3-己烯丁酸酯，(Z)-3-己烯-1-醇，罗勒烯和苯甲醇 EAG 反应比雌蛾高，但雌蛾对芳樟醇、(Z)-己酸-3-己烯酯和(Z)-茉莉酮的 EAG 反应高于雄蛾，有助于其通过这些挥发物更容易寻找寄主产卵（Magsi *et al.*，2021）。

明确植物挥发物对昆虫的引诱作用，是研制昆虫引诱剂的理论基础（徐正浩等，2004）。郑许松等（2021）研究表明苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇、庚醇、己醛、水杨酸甲酯、顺-3-己烯醛和乙酸苯甲酯 8 种植物挥发物对稻纵卷叶螟有引诱作用，但并未明确这些植物挥发物对稻纵卷叶螟的最佳引诱浓度范围及配比。本研究测定了稻纵卷叶螟成虫对不同浓度的植物挥发物的 EAG 反应，为精准筛选研制对稻纵卷叶螟具有生物活性的植物引诱剂奠定理论基础。

1　材料与方法

1.1　供试昆虫

稻纵卷叶螟成虫采自浙江金华稻田（119°38′41″E；29°05′33″N）。田间种群采回实验室后，将成虫配对饲养于带有 10%蜂蜜水棉花球的一次性杯（350 mL）中待其产卵，5 对每杯。卵孵化后用 4 日龄的小麦苗饲养，饲养 3 代后的成虫用于试验。昆虫饲养于人工气候室中，饲养条件设置为温度（26±1）℃，相对湿度 65%±5%，光周期 14L∶10D。

1.2　植物挥发物试剂

苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇、庚醇、己醛、水杨酸甲酯、乙酸苯甲酯及液体石蜡为北京阿拉丁试剂有限公司生产，分析纯。顺-3-己烯醛为上海吉至有限公司生产，分析纯。将上述 8 种植物挥发物分别用液体石蜡进行稀释并充分摇匀后，配制成浓度为 0.1、1、10、100 和 500 g/L 的测试溶液，以液体石蜡为对照。

1.3 稻纵卷叶螟成虫对植物挥发物的触角电位测定

将初羽化（< 12 h）的稻纵卷叶螟区分雌雄成虫，并设置 3 种处理。1）单头蜂蜜水处理，将雌雄成虫单头饲养于带有 10% 蜂蜜水棉花球的一次性杯；2）单头清水处理，将雌雄成虫单头饲养于带纯水湿润棉花球的一次性杯；3）配对蜂蜜水处理，配对后饲养于带有 10% 蜂蜜水棉花球的一次性杯。饲养 2 d 后的稻纵卷叶螟成虫用于触角电位测定。每处理重复 10 次。

用触角电位仪 EAG（IDAC-2，德国 Syntech 公司生产）测定不同生理状态稻纵卷叶螟对植物挥发物的触角电位反应，测定方法参照 Sun 等（2014）及程建军等（2016）等的方法。先将待测稻纵卷叶螟一侧触角从基部切下，同时切除尖端 1 mm 左右，用 SpectraR360 导电胶将其固定在 PR 电极的两端，取 10 μL 待测植物挥发物溶液均匀滴加在 4.0 cm × 0.7 cm 的滤纸上后，置于巴斯德移液管中并用作刺激源，刺激时间为 0.7 s，两次刺激间隔为 30 s，不同浓度之间的测定间隔 1 min。每根触角测试单个化合物的所有浓度，测试挥发物从低浓度到高浓度依次测定。每处理重复 10 次。

1.4 数据处理与分析

用 SPSS23.0 进行数据统计分析，稻纵卷叶螟成虫对同种植物挥发物不同浓度的 EAG 反应的比较采用单因素方差分析，Duncan's 进行多重比较，两两比较采用独立样本 *t*-检验，交互作用采用双因素方差分析。图表绘制在 GraphPad Prism 软件中进行。图表中数据均为平均值 ± 标准误。

EAG 相对值计算方法：EAG 相对值=成虫对植物挥发物的触角电位反应平均值 /［（测试前对照的 EAG 平均值+测试后的 EAG 平均值）/ 2］×100%。

2 结果与分析

2.1 稻纵卷叶螟成虫对 8 种植物挥发物的 EAG 反应

在苯甲醛浓度为 100 g/L 时，取食清水未交配雄蛾的 EAG 反应最大，达到 254.9%±57.5%，与除取食未交配雄蛾以外其他种生理状态的 EAG 反应都有显著性差异（F=3.841，df=42，P< 0.05）；与取食清水未交配雄蛾对浓度为 10 g/L 和 500 g/L 的 EAG 反应无显著性差异（F=0.135，df=27，P=0.874）（图 1：A）。在苯乙醛浓度为 500 g/L 时，取食蜂蜜水已交配雄蛾的 EAG 反应最大，达到 336.6%±26.8%，除与取食蜂蜜水未交配雄蛾的 EAG 反应没有显著性差异外，与其他 4 种处理组均存在显著性差异（F=8.505，df= 42，P<0.05）；取食蜂蜜水已交配雄蛾对苯乙醛不同浓度处理中，雄蛾对苯乙醛浓度为 500 g/L 的 EAG 反应与浓度为 100 g/L 的 EAG 反应没有显著性差异，但显著高于其他浓度处理（F= 10.834，df=24，P<0.05）（图 1：B）。芳樟醇浓度为 10 g/L 时，取食蜂蜜水未交配雄蛾对芳樟醇的 EAG 反应最大，达到 238.8%±22.0%，显著高于其他 5 种生理状态的稻纵卷叶螟对芳樟醇的 EAG 反应（F=10.834，df=24，P<0.05）（图 1：C）。取食蜂蜜水未交配雄蛾对芳樟醇浓度为 10 g/L、100 g/L 和 500 g/L 的 EAG 反应均没有显著性差异（F=0.224，df=27，P=0.801）（图 1：C）。庚醇浓度为 100 g/L 时，取食蜂蜜水未交配雄蛾对庚醇的 EAG 反应最大，达到 300.6%±24.6%，显著高于 3 组雌蛾处理组（F=11.428，df=36，P< 0.001），但与其他两组生理状态雄蛾的 EAG 反应没有显著性差异（F=0.377，df=24，P=0.69）；在取食蜂蜜水未交配雄蛾处理组中，雄蛾对浓度为 10、100 和 500 g/L 庚醇的 EAG 反应均没有显著性差异（F=0.534，df=27，P=0.592）（图 1：D）。己醛浓度为 500 g/L 时，取食清水未交配雄蛾对己醛的 EAG 反应相对值最大，达到 442.3%± 48.4%，与取食蜂蜜水未交配雄蛾的 EAG 反应没有显著性差异，但显著高于其他处理组（F=4.567，df=42，P<0.05）；在取食清水未交配雄蛾处理组中，雄蛾对浓度为 500 g/L 与 100 g/L 己醛的 EAG 反应没有显著性差异，但显著高于其他浓度处理（F=13.903，df=36，P<0.05）（图 1：E）。水杨酸甲酯浓度为 100 g/L 时，取食蜂蜜水未交配雄蛾对水杨酸甲酯的 EAG 反应最大，达到 190.7%±22.7%，与其他生理状态雄蛾

对水杨酸甲酯的 EAG 反应没有显著差异（F=1.412，df=24，P=0.263）；在取食蜂蜜水未交配雄蛾处理组中，雄蛾对浓度为 10、100 和 500 g/L 水杨酸甲酯的 EAG 反应均无显著差异（F=0.243，df=27，P=0.786）（图 1：F）。顺-3-己烯醛浓度为 500 g/L 时，取食蜂蜜水未交配雄蛾对顺-3-己烯醛的 EAG 反应最大，达到 341.2%±46.4%，与取食清水未交配雄蛾之间无显著差异，但显著高于其他生理状态的处理组（F=7.708，df=42，P<0.05）；在取食蜂蜜水未交配雄蛾处理组中，雄蛾对浓度为 500 g/L 顺-3-己烯醛的 EAG 反应显著高于其他浓度（F=13.862，df=45，P<0.05）（图 1：G）。乙酸苯甲酯浓度为 100 g/L 时，取食蜂蜜水未交配雄蛾对乙酸苯甲酯的 EAG 反应最大，达到 300.3%±51.3%，显著高于其他生理状态的处理组（F=8.627，df=50，P<0.05）；在取食蜂蜜水未交配雄蛾的处理组中，雄蛾对浓度为 10、100 和 500 g/L 乙酸苯甲酯的 EAG 反应间均没有显著差异（F=0.086，df=27，P=0.918）（图 1：H）。

2.2　交配对稻纵卷叶螟成虫 EAG 反应的影响

未交配雌蛾对苯乙醛的 EAG 反应相对值显著高于已交配雌蛾（t=8.004，P<0.01）；未交配雌蛾对苯甲醛的 EAG 反应相对值显著高于已交配雌蛾（t=2.001，P<0.05）（图 2：A）。其中未

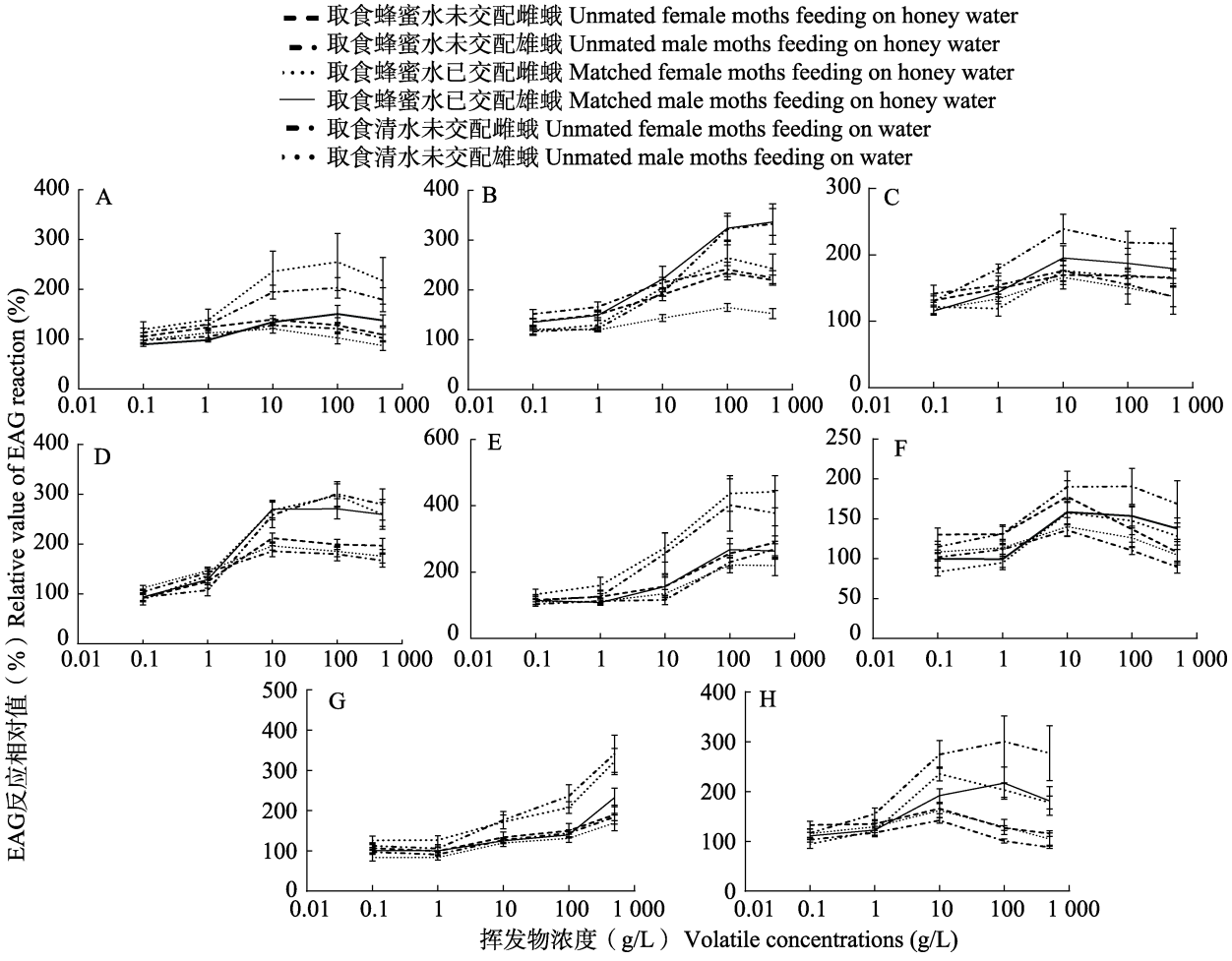

图 1　不同生理状态的稻纵卷叶螟对植物挥发物的 EAG 反应

Fig. 1　EAG responses of *Cnaphalocrocis medinalis* in different physiological states to plant pheromones

A. 苯甲醛；B. 苯乙醛；C. 芳樟醇；D. 庚醇；E. 己醛；F. 水杨酸甲酯；G. 顺-3-己烯醛；H. 乙酸苯甲酯。
A. Benzaldehyde; B. Phenylacetaldehyde; C. Linalool; D. 1-heptanol; E. Hexanal; F. Methyl salicylate; G. Cis-3-hexenal; H. Benzyl acetate.

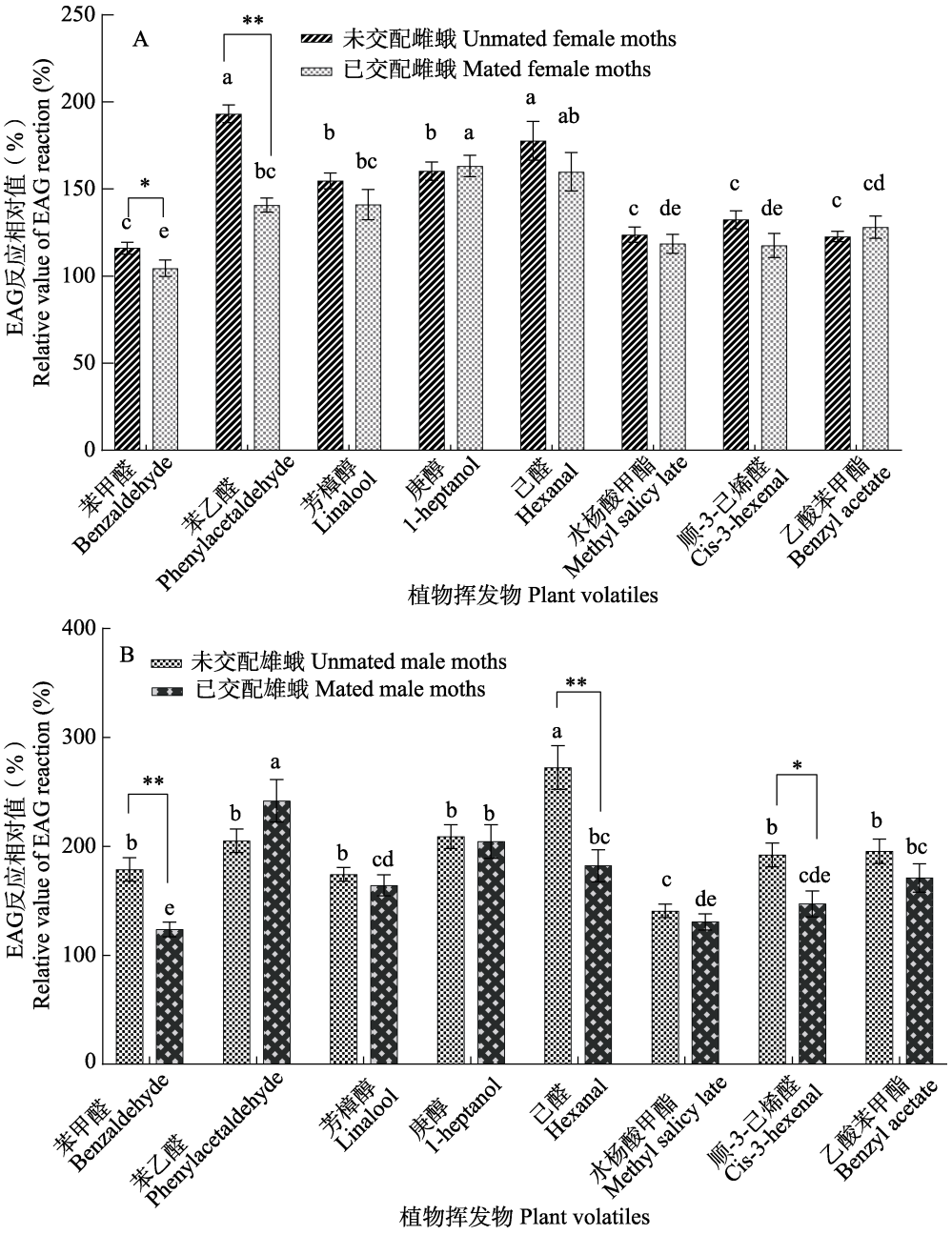

图 2　交配对稻纵卷叶螟 EAG 反应的影响

Fig. 2　EAG responses of mated or unmated *Cnaphalocrocis medinalis* to plant volatiles

A. 交配前后的雌蛾对植物挥发物的 EAG 反应；B. 交配前后的雄蛾对植物挥发物的 EAG 反应。柱上标有相同字母表示相同处理组稻纵卷叶螟对不同挥发物的 EAG 反应间无显著差异，柱上标有不同字母表示存在显著差异（$P < 0.05$，单因素方差分析的 Duncan's 多重比较方法）。*表示不同交配状态对同种植物挥发物的 EAG 反应存在差异显著（$P < 0.05$，独立样本 *t*-检验），**表示不同交配状态对同种植物挥发物的 EAG 反应存在差异极显著（$P < 0.01$，独立样本 *t*-检验）。下图同。

A. EAG responses of mated or unmated female moths to plant volatiles. B. EAG responses of mated or unmated male moths to plant volatiles.

Histograms with the same letters indicate there is no significant difference between the EAG responses of *C. medinalis* to the different volatiles in the same treatment group, while with the different letters indicate significant differences ($P < 0.05$, One-way ANOVA Duncan's multiple range test). * indicates significant differences between different treatment groups of *C. medinalis* for the same test volatiles at 0.05 level by *t*-test, ** indicates extremely significant differences between different treatment groups of *C. medinalis* for the same test volatiles at 0.01 level by *t*-test. The same bellow.

交配雄蛾对苯甲醛或己醛的 EAG 反应相对值极显著高于已交配雄蛾(苯甲醛: t=4.332, P<0.001; 己醛: t=3.618, P<0.001), 未交配雄蛾对顺-3-己烯醛的 EAG 反应相对值显著高于已交配雄蛾(t=2.776, P<0.01)(图 2: B)。

2.3　取食对稻纵卷叶螟成虫 EAG 反应的影响

取食蜂蜜水的雌蛾对乙酸苯甲酯和水杨酸甲酯的 EAG 反应显著高于取食清水的雌蛾(水杨酸甲酯: t=3.124, P<0.01; 乙酸苯甲酯: t=4.271, P<0.001)(图 3: A)。取食清水的雌蛾对苯乙醛的 EAG 反应显著高于取食蜂蜜水的雌蛾(t=4.298, P<0.001)(图 3: A)。取食清水的雄蛾对苯甲醛和己醛的 EAG 反应显著高于取食蜂蜜水的雄蛾(苯甲醛: t=2.239, P<0.05; 己醛: t=1.988, P<0.05)(图 3: B)。取食蜂蜜水的雄蛾对乙酸苯甲酯、水杨酸甲酯和芳樟醇的 EAG 反应显著高于取食清水的雄蛾(乙酸苯甲酯, t=2.277, P<0.05; 水杨酸甲酯, t=2.442, P<0.05; 芳樟醇: t=3.586, P<0.01)(图 3: B)。

2.4　交配与取食的交互作用

稻纵卷叶螟对 8 种被测植物挥发物的 EAG 反应存在显著差异(F=37.136, df=2 274, P< 0.001)(图 1)。稻纵卷叶螟雄蛾对植物挥发物的 EAG 反应强于雌蛾(F=209.151, df=2 274, P< 0.001)(图 1)。取食与交配之间的交互作用显著影响着稻纵卷叶螟成虫触角对 8 种植物挥发物的 EAG 反应(雌蛾: F=3.998, df=1 197, P< 0.01, 雄蛾: F=7.462, df=1 077, P<0.001)(图 2, 图 3)。

3　结论与讨论

昆虫与植物经过长期的进化和协同作用, 植物释放的挥发性物质可以引诱昆虫进行交配、产卵等行为(王鹏和张龙, 2021)。本研究测定了稻纵卷叶螟在 8 种植物挥发物的 5 种不同浓度下的 EAG 反应, 结果表明, 8 种植物挥发物均能引起稻纵卷叶螟不同生理状态的成虫的显著性的触角电位反应。稻纵卷叶螟成虫对苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇、庚醇、水杨酸甲醛、顺-3-己烯醛和乙酸苯甲醛的 EAG 反应主要随着浓度的增大呈现先增加后减少的趋势, 在浓度为 10 g/L 或 100 g/L 时 EAG 反应最大; 对顺-3-己烯醛的 EAG 反应主要随着浓度的增大而增大, 在浓度为 500 g/L 时 EAG 反应最大(图 1: G)。取食蜂蜜水未交配雄蛾和取食蜂蜜水已交配雌蛾、雄蛾对己醛的 EAG 反应随着浓度的增大呈现先增加后减少的趋势, 其他 3 种生理状态的 EAG 反应随着浓度的增大而增大(图 1: E)。枣飞象 *Scythropus yasumatsui* Kono et Morimoto 成虫对挥发物 D-柠檬烯、正十三烷、正十四烷、正十五烷、壬醛、棕榈酸甲酯和油酸甲酯的 EAG 的变化是随着浓度的增加先升高后降低, 在 50 g/L 时达到最大(阎雄飞等, 2020), 该结果与本研究的结果一致。

目前, 有关昆虫成虫取食不同营养对昆虫选择行为方面影响的研究鲜有报道(李祥等, 2021), 本研究发现取食蜂蜜水未交配雌蛾对植物挥发物的 EAG 反应显著高于取食清水未交配雌蛾(t=2.611, P<0.05), 而取食蜂蜜水未交配雄蛾对植物挥发物的 EAG 反应与取食清水未交配雄蛾没有显著性差异(t=1.563, P=0.118), 本研究结果与徐瑞斌等(2016)对小菜蛾 *Plutella xylosella* Linnaeus 行为反应测试结果相似。徐瑞斌等(2016)研究表明取食蜂蜜水、红糖水和蔗糖水的小菜蛾雌蛾比取食蒸馏水的小菜蛾雌蛾对寄主植物挥发物异硫氰酸丙烯酯选择率高, 而取食蜂蜜水、红糖水、蔗糖水和蒸馏水的雄蛾对性信息素的 EAG 反应没有显著性差异。Guo 等(2022)研究表明稻纵卷叶螟雌蛾交配前取食 1 d 清水对其产卵和飞行能力没有显著影响, 取食 2 d 以上清水会导致稻纵卷叶螟产卵量下降, 取食 3 d 后稻纵卷叶螟飞行时间、飞行速度以及飞行距离显著降低。进一步研究发现取食清水延缓了稻纵卷叶螟的卵巢发育和降低了稻纵卷叶螟的交配率(Hari *et al.*, 2008; 樊茹静等, 2019), 这可能是由于取食影响了稻纵卷叶螟触角感受器和卵巢的发育及其反应机制。取食清水的稻纵卷叶螟雌蛾可能因缺少足够的营养, 导致对植物挥发物的灵敏度下降。

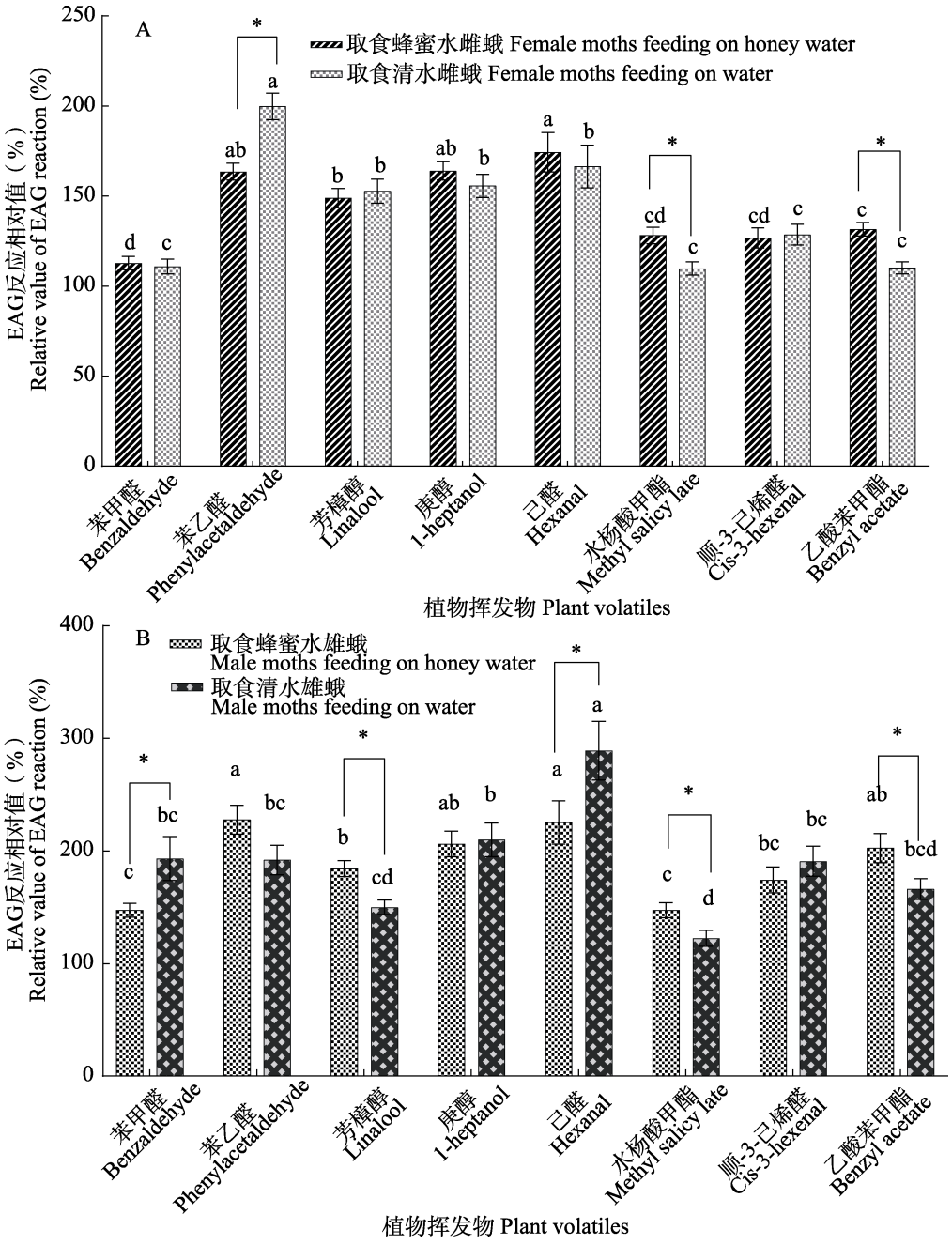

图 3　取食对稻纵卷叶螟 EAG 反应的影响

Fig. 3　EAG responses of *Cnaphalocrocis medinalis* to plant volatiles under different feeding conditions

A. 取食清水或蜂蜜水的雌蛾对植物挥发物的 EAG 反应；B. 取食清水或蜂蜜水的雄蛾对植物挥发物的 EAG 反应。

A. EAG responses of female moths feeding on honey water or water to plant volatiles;
B. EAG responses of male moths feeding on honey water or water to plant volatiles.

昆虫的性别和交配状态对同种挥发物的 EAG 反应存在差异性（Schott *et al.*，2013）。本研究中稻纵卷叶螟雌蛾和雄蛾对植物挥发物的 EAG 反应有显著性差异（F=121.652，df=2 278，P<0.001），稻纵卷叶螟雄蛾比雌蛾对植物挥发物的 EAG 反应值高，这与程建军等（2016）研究稻纵卷叶螟的雌蛾和雄蛾对 43 种禾本植物挥发物的 EAG 反应的结果一致。这可能与稻纵卷叶螟雄蛾的化学感受蛋白（Chemosensory protein, Cmedcsp3）和气味结合蛋白（Odorant binding

proteins, OBPs）的表达量比雌蛾的表达量高，且雄蛾触角比雌蛾触角发达有关（Zeng *et al.*，2013；Sun *et al.*，2019）。本研究结果表明稻纵卷叶螟未交配和已交配的雌蛾和雄蛾对 8 种植物挥发物都有一定的 EAG 反应，总体上未交配雌、雄蛾显著高于已交配的雌、雄蛾的 EAG 反应。唐晓琴等（2021）研究表明冷杉梢斑螟 *Dioryctria abietella* Denis & Schiffermüller 的未交配雌蛾对挥发物 α-蒎烯、β-蒎烯、(1S)-(-)-β-蒎烯、柠檬烯、月桂烯和正己烷的 EAG 反应高于已交配雌蛾的 EAG 反应。李祥等（2021）的研究显示马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* Zeller 未交配雌蛾对反-β-罗勒烯、水杨酸甲酯和对-聚伞花素的 EAG 反应比已交配雌蛾的 EAG 反应值高，该结果与本研究的结果一致。陈丽慧等（2019）的研究发现梨小食心虫 *Grapholita molesta* Busck 的未交配雌蛾气味受体（Odorant receptors）*GmolOR20* 基因的表达量比已交配雌蛾气味受体 *GmolOR20* 基因的表达量高。推测昆虫的交配状态会影响雌蛾对挥发物的 EAG 反应。

尽管本研究已经得到 8 种常见植物挥发物单体对稻纵卷叶螟 EAG 反应的最佳反应浓度，但不代表这一浓度下的植物挥发物对稻纵卷叶螟都有引诱作用，也可能是趋避作用，有待进一步的行为测试以及田间试验进行验证。同时本研究的结果为研制稻纵卷叶螟植物源引诱剂奠定了理论基础。

参考文献 (References)

Bao YX, Wang MF, Chen C, Lu MH, Liu WC, 2019. Impact of East Asian summer monsoon advancing and retreating on occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in the main rice-growing regions of south China. *Acta Ecologica Sinica*, 39(24): 9351–9364. [包云轩, 王明飞, 陈粲, 陆明红, 刘万才, 2019. 东亚夏季风进退对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟发生的影响. 生态学报, 39(24): 9351–9364.]

Cheng JJ, Zhu J, Liu F, 2016. EAG response of *Cnaphalocrocis medinalis* to 43 graminaceous plant volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(3): 472–481. [程建军, 朱均, 刘芳, 2016. 稻纵卷叶螟对 43 种禾本科植物挥发物的触角电位(EAG)反应. 应用昆虫学报, 53(3): 472–481.]

Chen LH, Li MM, Chen XL, WU JX, Xu XL, 2019. Cloning and expression profiling of general odorant receptor gene *GmolOR20* in the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Acta Entomologica Sinica*, 62(4): 418–427. [陈丽慧, 李梅梅, 陈秀琳, 仵均祥, 许向利, 2019. 梨小食心虫普通气味受体基因 *GmolOR20* 的克隆及表达分析. 昆虫学报, 62(4): 418–427.]

Fan RJ, Guo JW, Zhang J, Li P, Hu G, Zhai BP, 2019. Parameters for the determination of adult of the rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Plant Protection*, 45(5): 135–141, 162. [樊茹静, 郭嘉雯, 张洁, 李平, 胡高, 翟保平, 2019. 稻纵卷叶螟成虫日龄的判定指标. 植物保护, 45(5): 135–141, 162.]

Hari NS, Jindal J, Malhi NS, Khosa JK, 2008. Effect of adult nutrition and insect density on the performance of spotted stem borer, *Chilo partellus* Swinhoe (Lepidoptera: Crambidae) in laboratory cultures. *Journal of Pest Science*, 81(1): 23–27.

Gharaei AM, Ziaaddini M, Frérot B, Ebrahimi SN, Jalali MA, Reddy GVP, 2020. Identification and evaluation of four cucurbitaceous host plant volatiles attractive to *Diaphania indica* (Saunders) (Lepidoptera: Pyralidae). *Chemoecology*, 30(4): 173–182.

Guo JW, Cui Y, Lin PJ, Zhai BP, Lu ZX, Chapman JW, Hu G, 2022. Male nutritional status does not impact the reproductive potential of female *Cnaphalocrocis medinalis* moths under conditions of nutrient shortage. *Insect Science*, 29(2): 467–477.

Li X, Zhang XJ, Xiao C, Dong WX, 2021. Electroantennogram responses of *Phthorimaea operculella* of different sexes and mating states to potato volatiles. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(3): 547–555. [李祥, 张小娇, 肖春, 董文霞, 2021. 不同性别和交配状态的马铃薯块茎蛾对马铃薯挥发物的触角电位反应. 中国农业科学, 54(3): 547–555.]

Liu L, Sun LN, Zhang HJ, Qiu GS, Yan WT, Yue Q, 2022. EAG and olfactory behavior responses of *Carposina sasakii* female adults to 22 volatiles from apple fruit. *China Fruits*, 221(3): 69–73. [刘柳, 孙丽娜, 张怀江, 仇贵生, 闫文涛, 岳强, 2022. 桃小食心虫雌成虫对苹果果实 22 种挥发物 EAG 和嗅觉行为反应. 中国果树, 221(3): 69–73.]

Ma QH, Wang K, Ren YJ, Zhang SM, Zhao JQ, Fang J, Meng ZJ, 2021. Electroantennogram and behavioral response of the adult *Hyphantria cunea* to active volatiles from *Fraxinus mandshurica*. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 52(6): 689–696. [马庆辉, 王楷, 任英杰, 张书曼, 赵佳齐, 方静, 孟昭军, 2021. 美国白蛾成虫对水曲柳活性挥发物的触角电位和行为反应. 沈阳农业大学学报, 52(6): 689–696.]

Magsi FH, Luo ZX, Zhao YJ, Li ZQ, Cai XM, Bian L, Chen ZM, 2021. Electrophysiological and behavioral responses of *Dasychira baibarana* (Lepidoptera: Lymantriidae) to tea plant volatiles.

Environmental Entomology, 50(3): 589–598.

Ren LL, Balakrishnan K, Luo YQ, Schütz S, 2017. EAG response and behavioral orientation of *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire) (Coleoptera: Bothrideridae) to synthetic host-associated volatiles. *PLoS ONE*, 12(12): e0190067.

Schott M, Wehrenfennig C, Gasch T, Vilcinskas A, 2013. Insect antenna-based biosensors for in situ detection of volatiles// Vilcinskas A(ed.). Yellow Biotechnology II. vol 136. Heidelberg: Springer. 101–122.

Sun SF, Zeng FF, Yi SC, Wang MQ, 2019. Molecular screening of behaviorally active compounds with CmedOBP14 from the rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. *Journal of Chemical Ecology*, 45(10): 849–857.

Sun X, Liu Z, Zhang AJ, Dong HB, Zeng FF, Pan XY, Wang YM, Wang MQ, 2014. Electrophysiological responses of the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis*, to rice plant volatiles. *Journal of Insect Science*, 14(1): 70.

Tang XQ, Wang SZ, Lu J, Gao T, Chen YQ, 2021. Electroantennogram and behavioral responses of *Dioryctria abietella* to volatiles from *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* Cones. *Forestry Science Research*, 34(6): 140–148. [唐晓琴, 王思展, 卢杰, 高郯, 陈羿渠, 2021. 冷杉梢斑螟对林芝云杉球果挥发物的触角电位及行为反应. 林业科学研究, 34(6): 140–148.]

von Arx M, Schmidt-Büsser D, Guerin PM, 2011. Host plant volatiles induce oriented flight behaviour in male European grapevine moths, *Lobesia botrana*. *Journal of Insect Physiology*, 57(10): 1323–1331.

Wang P, Zhang L, 2021. Olfaction in the process of herbivorous insect food selection. *Journal of Environmental Entomology*, 43(3): 633–641. [王鹏, 张龙, 2021. 植食性昆虫的嗅觉选食过程及其机制研究进展. 环境昆虫学报, 43(3): 633–641.]

Wang X, Hu LC, Zhou GX, Cheng JA, Lou YG, 2011. Salicylic acid and ethylene signaling pathways are involved in production of rice trypsin proteinase inhibitors induced by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). *Chinese Science Bulletin*, 56(22): 2351–2358.

Xu HX, Zheng XS, Tian JC, Lai FX, He JC, Lü ZX, 2017. Advances in the development and application of control technologies for insect pest management in paddy fields in China. *Journal of Plant Protection*, 44(6): 925–939. [徐红星, 郑许松, 田俊策, 赖凤香, 何佳春, 吕仲贤, 2017. 我国水稻害虫绿色防控技术的研究进展与应用现状. 植物保护学报, 44(6): 925–939.]

Xu RB, Lin S, Tian HJ, Chen YX, Zhao JW, Chen Y, Yang G, Wei H, 2016. Effects of adult feeding on the olfactory behavior, electroantennogram and fecundity of the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 31(2): 161–165. [徐瑞斌, 林硕, 田厚军, 陈艺欣, 赵建伟, 陈勇, 杨广, 魏辉, 2016. 不同营养源对小菜蛾成虫嗅觉行为、触角电位反应和繁殖力的影响. 福建农业学报, 31(2): 161–165.]

Xu ZH, Cui SR, He Y, Li D, Zhao M, Zhang X, Yu LQ, 2004. Plant secondary metabolites and their effects on insect management. *Plant Protection*, 30(4): 8–11. [徐正浩, 崔绍荣, 何勇, 李迪, 赵明, 张旭, 余柳青, 2004. 植物次生代谢物质和害虫防治. 植物保护, 30(4): 8–11.]

Yan XF, Liu YH, Wang YW, Li G, Jing R, Yang YJ, 2020. EAG and behavioral responses of *Scythropus yasumatsui* (Coleoptera: Curculionidae) to volatiles from the common jujube (*Zizyphus jujuba*). *Acta Entomologica Sinica*, 63(8): 981–991. [阎雄飞, 刘永华, 王亚文, 李刚, 景瑞, 杨亚洁, 2020. 枣飞象对枣树植物挥发物的 EAG 和行为反应. 昆虫学报, 63(8): 981–991.]

Zhao ZH, Sandhu HS, Ouyang F, Ge F, 2016. Landscape changes have greater effects than climate changes on six insect pests in China. *Science China* (*Life Sciences*), 59(6): 627–633.

Zhao J, Cai WL, Shen LY, Zhu HY, Pu L, Xie MQ, Zou YL, Hua HX, 2022. Current situation and prospect of green rice pest control technology. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 41(1): 92–104. [赵景, 蔡万伦, 沈栎阳, 朱宏远, 蒲雷, 谢美琦, 邹玉兰, 华红霞, 2022. 水稻害虫绿色防控技术研究的发展现状及展望. 华中农业大学学报, 41(1): 92–104.]

Zeng FF, Sun X, Dong HB, Wang MQ, 2013. Analysis of a cDNA library from the antenna of *Cnaphalocrocis medinalis* and the expression pattern of olfactory genes. *Biochemical and Bophysical Research Communications*, 433(4): 463–469.

Zheng XS, Lü ZX, Xu HX, Lu YH, Yang YJ, Tian JC, 2021. An attractant that can lure both female and male moths of *Cnaphalocrocis medinalis* at the same time and its application. China, Invent: CN113519520A, 2021-10-22. [郑许松, 吕仲贤, 徐红星, 鲁艳辉, 杨亚军, 田俊策, 2021. 一种能同时引诱稻纵卷叶螟雌蛾和雄蛾的引诱剂及其应用. 中国, 发明公开. CN113519520A. 2021-10-22.]

Zheng XS, Lü ZX, Xu HX, Lu YH, Yang YJ, Tian JC, 2021. An attractant to *Cnaphalocrocis medinalis* based on the combination of flower aroma substance and green leaf substance and its application. China, Invent. CN113519521A. 2021-10-22. [郑许松, 吕仲贤, 徐红星, 鲁艳辉, 杨亚军, 田俊策, 2021. 一种基于花香物质和绿叶物质组合的稻纵卷叶螟引诱剂及其应用, 中国, 发明公开. CN113519521A. 2021-10-22.]