

印楝素对褐飞虱诱导的水稻植株挥发物释放的影响*

卢海燕 刘芳 祝树德** 张青

(扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏扬州 225009)

摘要 利用固相微萃取法收集施用印楝素对褐飞虱诱导的水稻挥发物, 并通过气相色谱-质谱联用仪对其进行分离和鉴定. 共收集到褐飞虱为害稻株挥发物 25 种, 其中已定性组分 14 种, 以倍半萜类化合物(9 种)为主. 褐飞虱为害稻株挥发物比健康稻株多柠檬烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、未知 6、未知 7、姜烯、橙花叔醇、正十七烷 8 种组分. 印楝素处理未导致新的挥发物组分产生, 但使褐飞虱诱导的挥发物组分相对含量发生变化. 印楝素的浓度导致柠檬烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、未知 6、姜烯、正十六烷 6 种组分相对含量发生明显变化, 而水杨酸甲酯、未知 6、未知 7、姜烯、橙花叔醇 5 种挥发物组分相对含量因施药天数不同而存在显著差异; 印楝素与水稻品种、害虫密度等生物因子间的互作使所有虫害诱导挥发物组分相对含量均发生显著改变.

关键词 水稻 印楝素 褐飞虱 虫害诱导的挥发物

文章编号 1001-9332(2010)01-0197-06 中图分类号 S43 S48 文献标识码 A

Effects of azadirachtin on rice plant volatiles induced by *Nilaparvata lugens*. LU Hai-yan, LIU Fang, ZHU Shu-de, ZHANG Qing (College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2010 21(1): 197-202.

Abstract: With the method of solid phase microextraction (SPME), a total of twenty-five volatiles were collected from rice plants induced by *Nilaparvata lugens*, and after applying azadirachtin fourteen of them were qualitatively identified by gas chromatography coupled by mass spectrometry (GC-MS), mainly of nine kinds of sesquiterpenes. Comparing with healthy rice plants, the plants attacked by *N. lugens* had more kinds of volatiles, including limonene, linalool, methyl salicylate, unknown 6, unknown 7, zingiberene, nerolidol, and hexadecane. Applying azadirachtin did not result in the production of new kind volatiles, but affected the relative concentrations of the volatiles induced by *N. lugens*. The proportions of limonene, linalool, methyl salicylate, unknown 6, zingiberene, and hexadecane changed obviously with the concentration of applied azadirachtin, while those of methyl salicylate, unknown 6, unknown 7, zingiberene, and nerolidol changed significantly with the days after azadirachtin application. Azadirachtin concentration, rice variety, and *N. lugens* density had significant interactions on the relative concentrations of all test *N. lugens*-induced volatiles.

Key words: rice; azadirachtin; *Nilaparvata lugens*; herbivore-induced volatile.

植物在遭受植食者攻击后能释放某些挥发物吸引植食者的天敌^[1-2]. 这一现象已被大量的室内和田间研究所证实^[3-5]. 因此, 有学者认为, 通过调节虫害诱导的植物挥发物来增强对害虫的控制作用具有重要的应用前景^[6].

虫害诱导的植物挥发物的释放受多种生态因子

(生物因子和非生物因子)的影响. 生物因子可以概括为两个方面: 植物和植食性昆虫. 植物方面的因素包括植物种类、品种(系)、发育阶段、受害部位、受害点的分布是否均匀、受害程度、受害持续时间等; 植食性昆虫方面的因素包括害虫的种类、发育阶段、口器的大小和形状、取食的行为方式等. 这方面的研究报道较多^[7-14]. 一些非生物因子, 如水分胁迫、光照条件、土壤温湿度、施肥水平、外用茉莉酸等会导致诱导的植物挥发物产生明显的变化^[15-18]. 总的来说, 非生物因子对虫害诱导的植物挥发物释放的影

* 国家自然科学基金项目(30500329)、国家科技支撑计划项目(2006BAD02A03)和苏州市农业科技攻关计划项目(SNG0817)资助.

** 通讯作者. E-mail: sdzhu@yzu.edu.cn

2009-03-25 收稿, 2009-10-31 接受.

响研究报道较少. 农药是农田生态系统中常见的非生物因子, 然而, 国内外关于农药对虫害诱导的植物挥发物释放的影响研究还非常缺乏. 2007—2008年, 笔者初步探索了有机磷农药三唑磷对稻纵卷叶螟诱导的水稻植株挥发物释放的影响. 结果表明, 有5种挥发物组分相对含量因三唑磷的浓度不同而发生变化; 有27种组分相对含量因施药天数不同而存在显著差异; 三唑磷与水稻品种、害虫密度等生物因子间还存在明显的互作. 可见, 三唑磷的施用可以影响虫害诱导的水稻挥发物的释放^[19]. 本文在此基础上, 进一步研究了植物源农药印楝素对褐飞虱诱导的水稻植株挥发物释放的影响, 比较了化学农药与植物源农药对虫害诱导的挥发物释放的影响差异, 以期为更好地利用植物挥发物间接防御作物虫害以及合理使用植物源农药提供参考.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为粳稻镇稻2号和秀水63, 种子分别由江苏省镇江市农业科学研究所和浙江省嘉兴市农业科学研究所提供. 种子于室内催芽后, 播于无虫网室的水泥槽中, 秧苗5叶期时移栽至直径35 cm, 高30 cm的塑料盆钵中, 每盆栽1穴, 1穴8根稻苗, 统一肥水管理. 选择苗龄为45 d的水稻幼苗待用. 褐飞虱虫源由中国水稻研究所提供, 于室内用汕优63稻苗系统饲养. 杀虫剂为0.3%印楝素EC, 由云南中科科技股份有限公司生产, 规格为100 ml. 挥发物标样: 植物挥发物标样共14种, 分别为柠檬烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、(-)-异喇叭烯、(-)- α -可巴烯、(-)- α -雪松烯、(-)-异石竹烯、(+)- β -雪松烯、反- β -法尼烯、姜烯、橙花叔醇、正十六烷、雪松醇、正十七烷, 购自美国Sigma公司. 溶剂正己烷为市售分析纯, 由国药集团化学试剂有限公司生产.

1.2 试验设计

试验采用水稻品种(X_1 : 镇稻2号、秀水63)、褐飞虱密度(X_2 : 每株2头、每株10头)、印楝素浓度(X_3 : 0、0.11、0.22 ml·m⁻²)和施药天数(X_4 : 1、3、5、7 d)4个因子的全组合试验设计, 共48个处理, 每处理重复3次.

根据试验设计对水稻进行3种处理, 分别为: 1)健康稻苗: 取苗龄45 d的盆栽水稻苗, 去除黄叶和小的分蘖, 再用自来水清洗干净, 进行挥发物的提取. 2)褐飞虱为害苗: 取上述健康稻苗, 接入受孕的褐飞虱雌成虫(每株2头和每株10头), 接虫后稻

株用中间具2个通气孔($\Phi = 5$ cm)的聚乙烯罩($\Phi 12$ cm×45 cm)罩上. 3)印楝素处理苗: 取上述褐飞虱为害苗, 在为害48 h后, 按0、0.11、0.22 ml·m⁻²印楝素浓度折算出每盆钵用量, 加水稀释500倍后叶面喷施印楝素, 然后分别在施药后的第1、3、5、7天进行挥发物的提取. 以同样处理的不施药稻苗为对照, 即分别在接虫后第3、5、7、9天进行挥发物的提取.

1.3 挥发物的收集、分离与鉴定

挥发物的提取利用固相微萃取法(SPME, 美国色谱科公司), 具体方法同卢海燕等^[19]. 挥发物组分分离、鉴定采用气谱(TRACE)-质谱(DSQ)联用仪, 分离条件同娄永根等^[9]. 通过核对谱库(NIST2001)中标准化化合物的质谱图, 对挥发物的各组分进行定性; 其中的部分组分又进一步与标样进行了对比定性, 并根据峰面积对各挥发物组分进行相对定量.

1.4 数据处理

对原始数据进行归一化处理, 用MathWorks公司开发的METLAB 7.1软件进行方差分析.

2 结果与分析

2.1 水稻挥发物组分组成

本试验共捕集到健康稻苗挥发物组分17种, 通过GC-MS分析以及挥发物标样核对, 鉴定了其中的8种组分. 褐飞虱为害苗和印楝素处理苗挥发物组分种类相同, 均为25种(表1), 其中已鉴定14种, 占总组分的56.0%, 主要为萜类及其氧化物(11种)、酯类(1种)和烷烃类(2种), 在已定性的组分中, 柠檬烯、芳樟醇等10种组分在水稻中已有较多报道. 与健康稻苗相比, 褐飞虱为害使稻株挥发物多了柠檬烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、未知6、未知7、姜烯、橙花叔醇、正十七烷8种组分. 本文将重点讨论褐飞虱诱导的这8种挥发物组分相对含量在施用印楝素后的变化情况.

2.2 印楝素主效因子对水稻挥发物组分相对含量的影响

印楝素浓度及施药天数2个主效因子对水稻挥发物组分相对含量影响的方差分析结果见表2. 在方差分析的基础上, 进一步比较了这2个主效因子对褐飞虱诱导的稻株挥发物组分相对含量的影响. 因印楝素浓度不同, 褐飞虱诱导的8种稻株挥发物组分中, 除未知7和橙花叔醇外的6种组分相对含量均有显著变化, 其中柠檬烯、芳樟醇、未知6、姜

表 1 水稻植株挥发物组分

Tab. 1 Volatiles released from rice plants

序号 Sequence number	保留时间 Retention time (min)	挥发物名称 Name of volatile	序号 Sequence number	保留时间 Retention time (min)	挥发物名称 Name of volatile
1	9. 80	柠檬烯 ^[5 9-10 18] Limonene	14	19. 87	未知 6 Unknown 6
2	11. 61	芳樟醇 ^[5 9-10 18] Linalool	15	20. 54	未知 7 Unknown 7
3	13. 91	水杨酸甲酯 ^[10 18] Methyl salicylate	16	20. 57	(Z)-法尼烯 ^[20] (Z)-Farnesene
4	18. 14	异喇叭烯 Isoledene	17	20. 78	姜烯 ^[20] (-)-Zingiberene
5	18. 28	可巴烯 ^[20] Copaene	18	20. 93	未知 8 Unknown 8
6	18. 57	未知 1 Unknown 1	19	21. 29	未知 9 Unknown 9
7	18. 86	(-)-α-雪松烯 (-)-α-Cedrene	20	21. 40	未知 10 Unknown 10
8	19. 05	未知 2 Unknown 2	21	21. 60	未知 11 Unknown 11
9	19. 19	未知 3 Unknown 3	22	22. 08	橙花叔醇 ^[10 18 20] Nerolidol
10	19. 22	异石竹烯 ^[10 18 20] Isocaryophyllene	23	22. 90	正十六烷 ^[5 9 18] n-Hexadecane
11	19. 36	(+)-β-雪松烯 (+)-β-Cedrene	24	23. 19	雪松醇 Cedrol
12	19. 50	未知 4 Unknown 4	25	24. 86	正十七烷 ^[5 9 18] n-Heptadecane
13	19. 69	未知 5 Unknown 5			

表 2 印楝素主效的方差分析

Tab. 2 Variance analysis of main effects of azadirachtin on rice volatiles

序号 Sequence number	药剂浓度 Concentration of azadirachtin		药剂处理后天数 Days after treatment	
	F	P	F	P
1	33. 75	0. 00	<1	-
2	10. 31	0. 00	1. 77	0. 16
3	6. 79	0. 00	6. 26	0. 00
4	14. 89	0. 00	18. 20	0. 00
5	19. 97	0. 00	12. 39	0. 00
6	46. 69	0. 00	3. 44	0. 02
7	26. 70	0. 00	4. 27	0. 01
8	22. 44	0. 00	4. 17	0. 01
9	16. 59	0. 00	12. 94	0. 00
10	53. 19	0. 00	4. 26	0. 01
11	26. 44	0. 00	14. 26	0. 00
12	<1	-	1. 06	0. 37
13	40. 38	0. 00	5. 35	0. 00
14	4. 06	0. 02	2. 80	0. 04
15	<1	-	3. 40	0. 02
16	21. 50	0. 00	1. 55	0. 21
17	311. 76	0. 00	5. 73	0. 00
18	10. 55	0. 00	1. 30	0. 28
19	15. 42	0. 00	8. 55	0. 00
20	131. 27	0. 00	2. 90	0. 04
21	3. 58	0. 03	3. 52	0. 02
22	2. 53	0. 08	3. 35	0. 02
23	19. 69	0. 00	<1	-
24	20. 54	0. 00	6. 39	0. 00
25	10. 03	0. 00	5. 30	0. 00

烯、正十六烷 5 种组分相对含量较未施药对照有所降低,而水杨酸甲酯则有所升高,这 6 种组分相对含量在不同浓度间差异均未达到显著水平(表 3)。褐飞虱诱导的 8 种水稻挥发物组分中,水杨酸甲酯、未知 6、未知 7、姜烯、橙花叔醇 5 种组分相对含量随施药天数的不同而发生显著改变,施药后第 1 天和第

7 天组分相对含量波动较大,而施药后第 3 天、第 5 天相对稳定,其中水杨酸甲酯、未知 7 相对含量的最低值出现在施药后第 1 天;未知 6 和姜烯相对含量的变化规律相似,均在施药后第 1 天出现最高值,在施药后第 7 天出现最低值(表 4)。

表 3 不同印楝素浓度处理的水稻挥发物组分的相对含量
Tab. 3 Relative contents of volatiles released from rice plants treated with azadirachtin at different concentrations (mean ± SD)

序号 Sequence number	印楝素浓度 Concentration of azadirachtin (ml · m ⁻²)		
	α (CK)	0. 11	0. 22
1	1. 25 ± 1. 22a	0. 43 ± 0. 74b	0. 23 ± 0. 27b
2	0. 67 ± 0. 10a	0. 27 ± 0. 42b	0. 23 ± 0. 30b
3	0. 07 ± 0. 09b	0. 13 ± 0. 16a	0. 13 ± 0. 15a
4	0. 86 ± 0. 47c	1. 22 ± 0. 79b	1. 43 ± 0. 93a
5	11. 80 ± 8. 37c	18. 87 ± 16. 98b	22. 44 ± 17. 61a
6	4. 35 ± 1. 36a	2. 66 ± 1. 95b	2. 35 ± 1. 91b
7	1. 99 ± 0. 82a	1. 25 ± 1. 24b	1. 11 ± 1. 12b
8	0. 64 ± 0. 32b	1. 30 ± 0. 64a	1. 20 ± 0. 62a
9	3. 90 ± 1. 83b	8. 41 ± 9. 02a	7. 66 ± 6. 60a
10	0. 88 ± 0. 31b	3. 01 ± 2. 16a	3. 13 ± 1. 81a
11	0. 57 ± 0. 52b	2. 59 ± 2. 91a	2. 32 ± 2. 46a
13	6. 97 ± 2. 63a	4. 13 ± 4. 94b	3. 29 ± 4. 56b
14	3. 29 ± 1. 67a	2. 29 ± 6. 87ab	1. 06 ± 2. 10b
16	1. 66 ± 0. 51b	3. 34 ± 2. 35a	3. 36 ± 2. 60a
17	14. 71 ± 6. 63a	2. 85 ± 4. 53b	2. 16 ± 3. 04b
18	1. 15 ± 0. 48b	3. 35 ± 4. 04a	3. 04 ± 2. 64a
19	3. 51 ± 1. 59a	2. 44 ± 1. 05b	2. 68 ± 1. 21b
20	11. 33 ± 2. 62a	4. 50 ± 2. 68b	5. 06 ± 2. 95b
21	5. 86 ± 2. 92a	4. 59 ± 2. 38b	5. 40 ± 2. 66ab
23	0. 64 ± 0. 64a	0. 33 ± 0. 27b	0. 30 ± 0. 25b
24	2. 69 ± 2. 68b	9. 75 ± 10. 28a	8. 98 ± 9. 36a
25	0. 43 ± 0. 51b	1. 21 ± 1. 25a	0. 93 ± 1. 24a

同行数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Data followed by different letters in the same row meant significant difference at 0. 05 level. 下同 The same below.

表 4 印楝素施用后不同天数的水稻挥发物组分的相对含量

Tab. 4 Relative contents of volatiles released from rice plants after azadirachtin treatment

序号 Sequence number	施药天数 Days after treatment (d)			
	1	3	5	7
3	0.07 ± 0.06c	0.10 ± 0.13bc	0.16 ± 0.18a	0.11 ± 0.15b
4	0.64 ± 0.55c	1.23 ± 0.89b	1.30 ± 0.79ab	1.51 ± 0.63a
5	10.69 ± 14.63b	18.15 ± 13.99a	20.03 ± 15.76a	21.95 ± 15.64a
6	3.21 ± 1.62ab	3.53 ± 1.94a	2.73 ± 1.93b	3.01 ± 2.29b
7	1.25 ± 1.02b	1.50 ± 1.16ab	1.74 ± 1.26a	1.31 ± 1.05b
8	1.29 ± 0.72a	0.94 ± 0.52b	1.05 ± 0.71b	0.89 ± 0.40b
9	10.34 ± 11.23a	5.35 ± 4.21b	5.68 ± 4.38b	5.25 ± 2.58b
10	2.95 ± 2.45a	2.17 ± 1.68b	2.19 ± 2.00b	2.03 ± 1.36b
11	3.22 ± 3.66a	1.33 ± 1.72b	1.35 ± 1.67b	1.40 ± 1.15b
13	5.23 ± 5.06a	5.55 ± 4.61a	4.71 ± 4.64a	3.70 ± 3.13b
14	3.67 ± 7.58a	2.34 ± 3.22ab	1.64 ± 1.98b	1.21 ± 1.10b
15	8.22 ± 6.33b	10.96 ± 7.49ab	10.71 ± 8.28ab	12.85 ± 10.61a
17	7.92 ± 10.53a	6.69 ± 6.21ab	6.46 ± 6.78bc	5.23 ± 6.00c
19	2.22 ± 1.01c	2.81 ± 1.23b	3.31 ± 1.72a	3.16 ± 1.22ab
20	5.99 ± 5.06b	7.37 ± 3.24a	7.23 ± 3.18a	7.26 ± 4.74a
21	4.28 ± 2.99b	5.52 ± 2.47a	6.03 ± 2.67a	5.31 ± 2.43ab
22	0.33 ± 0.15b	0.31 ± 0.20b	0.44 ± 0.41a	0.34 ± 0.17b
24	10.85 ± 12.45a	5.64 ± 6.47b	5.73 ± 6.94b	6.34 ± 6.80b
25	1.32 ± 1.64a	0.88 ± 1.09b	0.58 ± 0.64b	0.64 ± 0.57b

表 5 印楝素与其他因子交互效应方差分析

Tab. 5 Variance analysis of effects of interactions between azadirachtin and other factors on rice volatiles

序号 Sequence number	X_1X_3		X_2X_3		X_1X_4		X_2X_4		X_3X_4	
	<i>F</i>	<i>P</i>								
1	5.96	0.00	25.37	0.00	<1	-	3.20	0.03	2.35	0.04
2	<1	-	1.19	0.31	3.71	0.01	5.69	0.00	5.21	0.00
3	8.67	0.00	1.05	0.35	3.46	0.02	5.60	0.00	2.48	0.03
4	2.93	0.06	<1	-	1.28	0.29	4.79	0.00	<1	-
5	5.12	0.01	<1	-	6.57	0.00	6.30	0.00	<1	-
6	3.36	0.04	<1	-	6.59	0.00	2.58	0.06	<1	-
7	1.14	0.32	3.25	0.04	5.72	0.00	2.06	0.11	5.88	0.00
8	<1	-	<1	-	1.91	0.13	<1	-	1.44	0.21
9	3.81	0.03	7.27	0.00	5.70	0.00	18.36	0.00	6.08	0.00
10	4.92	0.01	4.27	0.02	6.85	0.00	3.47	0.02	3.91	0.00
11	<1	-	5.16	0.01	9.02	0.00	12.71	0.00	5.17	0.00
12	5.25	0.01	1.08	0.34	5.64	0.00	5.09	0.00	2.23	0.05
13	6.68	0.00	13.79	0.00	1.40	0.25	3.82	0.01	2.14	0.05
14	5.58	0.01	2.32	0.10	1.14	0.34	1.35	0.26	2.09	0.06
15	2.86	0.06	1.02	0.37	16.05	0.00	1.62	0.19	<1	-
16	8.85	0.00	<1	-	10.32	0.00	1.14	0.34	1.48	0.19
17	<1	-	14.50	0.00	3.52	0.02	4.81	0.00	19.77	0.00
18	<1	-	3.41	0.04	3.56	0.02	3.29	0.02	1.15	0.34
19	2.33	0.10	2.56	0.08	<1	-	4.44	0.01	2.79	0.01
20	1.66	0.20	1.83	0.17	3.19	0.03	3.10	0.03	6.46	0.00
21	<1	-	2.46	0.09	1.99	0.20	8.44	0.00	1.70	0.13
22	14.42	0.00	13.36	0.00	12.35	0.00	3.95	0.01	3.29	0.01
23	24.52	0.00	4.16	0.02	5.10	0.00	1.39	0.25	1.21	0.31
24	<1	-	7.80	0.00	4.56	0.01	6.87	0.00	3.71	0.00
25	2.25	0.11	2.54	0.08	4.32	0.01	5.42	0.00	1.32	0.25

X_1 水稻品种 Rice variety; X_2 褐飞虱密度 Density of *N. lugens*; X_3 印楝素浓度 Concentration of azadirachtin; X_4 施药天数 Days after azadirachtin treatment.

2.3 印楝素与其他因子互作对水稻挥发物组分相对含量的影响

由表5可知,印楝素与其他因子(水稻品种、褐飞虱密度)间存在明显的互作,这种互作效应导致包括褐飞虱诱导的8种组分在内的24种组分相对含量发生显著变化。印楝素浓度与水稻品种的互作导致柠檬烯、水杨酸甲酯、未知6、橙花叔醇及正十六烷5种虫害诱导的挥发物组分相对含量发生显著变化,印楝素浓度与褐飞虱密度的互作使柠檬烯、姜烯、橙花叔醇及正十六烷4种虫害诱导的挥发物组分相对含量发生显著变化,施药天数与水稻品种的互作导致芳樟醇、水杨酸甲酯、未知7、姜烯、橙花叔醇及正十六烷6种虫害诱导的挥发物组分相对含量发生显著变化,施药天数与褐飞虱密度、施药天数与印楝素浓度的互作效应相似,均使柠檬烯、芳樟醇、水杨酸甲酯、姜烯、橙花叔醇5种虫害诱导的挥发物组分相对含量发生显著变化。

3 讨 论

本研究共收集褐飞虱为害稻株挥发物组分25种,其中已定性的组分共14种,除了柠檬烯等10种组分在水稻挥发物中已有较多报道外,异喇叭烯、(-)- α -雪松烯、(+)- β -雪松烯、雪松醇等4种组分只在三唑磷对稻纵卷叶螟诱导的水稻植株挥发物的影响研究中首次报道过^[19]。与之前报道的水稻挥发物组分相比,本研究中的水稻挥发物组分种类减少,这可能与选用的昆虫的取食习性不同有关。前人研究认为,在同一种寄主植物上取食习性不同的植食性昆虫诱导的植物挥发物一般差异较大,类似稻飞虱等刺吸式口器的昆虫,由于其损伤植物的程度比稻纵卷叶螟等咀嚼式口器的昆虫小,因此有可能导致植物较少的挥发物释放^[9,41],这与本文的研究结果相一致。

印楝素是从楝科植物中分离得到的柠檬素类四环三萜化合物,对多种昆虫具有拒食、忌避、毒杀、调节生长发育、影响产卵等作用,是世界上公认的最适于商品开发的植物资源^[21]。目前应用印楝素防治水稻害虫的研究相当活跃。印楝提取物对大多数稻田常见害虫有防治效果,其中报道较多的是稻飞虱和水稻螟虫^[22-25]。印楝素不仅对害虫存在生物活性,对植物也具有一定的作用。Latha等^[26]发现,生长在印楝树木周围的水稻往往能够获得更高的产量,后来有学者研究认为,这种增产作用不仅是由于印楝树中的活性物质有效地控制了害虫,还可能是由于

印楝素对水稻植株的生长有一定的促进作用^[27]。本研究结果表明,印楝素的施用可以影响虫害诱导的水稻挥发物的释放,印楝素浓度、施药天数以及与其他因子的互作分别使包括虫害诱导的挥发物组分在内的88.0%(22种)、76.0%(19种)、96.0%(24种)的组分相对含量发生明显变化,而三唑磷的相应作用分别导致13.9%(5种)、75.0%(27种)、88.9%(32种)的组分相对含量发生显著改变^[19],可见,与化学农药三唑磷相比,植物源农药印楝素对稻株挥发物释放的影响作用更大,这可能与农药不同的作用方式有关,具体还有待进一步研究。

虫害诱导的植物挥发物作为寄主植物和天敌的互益素,具有调节植食性昆虫天敌行为的功能,它与植物源农药一样,为人类提供了安全、无公害的治虫新途径,必将在未来的害虫综合治理中起着重要的作用,而弄清它们之间的关系,是最大限度地发挥二者作用的基础。因此,继续深入开展植物源农药与虫害诱导的挥发物释放之间关系的研究十分必要。此外,施用印楝素使得褐飞虱诱导的水稻挥发物组分相对含量发生显著变化,这种变化所引起的生态学效应还有待进一步研究。

参考文献

- [1] Karban R, Baldwin IT. Induced Responses to Herbivory. Chicago: University of Chicago Press, 1997
- [2] Paré PW, Tumlinson JH. Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiology*, 1999, **121**: 325-398
- [3] Lou YG, Hua XY, Turlings TCJ, et al. Differences in induced volatile emissions among rice varieties result in differential attraction and parasitism of *Nilaparvata lugens* eggs by the parasitoid *Anagrus nilaparvatae* in the field. *Journal of Chemical Ecology*, 2006, **32**: 2375-2387
- [4] Rapusas HR, Bottrell DG, Coll M. Intraspecific variation in chemical attraction of rice to insect predators. *Biological Control*, 1996, **6**: 394-400
- [5] Lou YG, Ma B, Cheng JA. Attraction of the parasitoid *Anagrus nilaparvatae* to rice volatile induced by the rice brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, **31**: 2357-2372
- [6] Turlings TCJ, Ton J. Exploiting scents of distress: The prospect of manipulating herbivore-induced plant odours to enhance the control of agricultural pests. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, **9**: 421-427
- [7] Hao D-J (郝德君), Ma F-L (马凤林), Wang Y (王焱), et al. Electroantennogram and behavioral responses of *Monochamus alternatus* to the volatiles from *Pinus thunbergii* with different physiological status. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**

- (6):1070-1074 (in Chinese)
- [8] Takabayashi J, Dicke M, Posthumus MA, *et al.* Variation in composition of predator-attracting allelochemicals emitted by herbivore-infested plants: Relative influence of plant and herbivore. *Chemoecology*, 1991, **2**:1-6
- [9] Lou Y-G (娄永根), Cheng J-A (程家安), Ping X-F (平霄飞), *et al.* Discrimination by the egg parasitoid *Anagrus nilaparvatae* between two hosts, *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera*. *Acta Entomologica Sinica* (昆虫学报), 2002, **45** (6):770-776 (in Chinese)
- [10] Xu T (徐涛), Zhou Q (周强), Xia Q (夏婧), *et al.* Effect of herbivore-induced rice volatiles on the host selection behavior of the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2002, **47** (11):849-853 (in Chinese)
- [11] Turlings TCJ, Bernasconi M, Bertossa R, *et al.* The induction of volatile emissions in maize by three herbivore species with different feeding habits: Possible consequences for their natural enemies. *Biological Control*, 1998, **11**:122-129
- [12] Kranthi S, Kranthi KR, Wanjarri RR. Influence of semilooper damage on cotton host-plant resistance to *Helicoverpa armigera* (Hub). *Plant Science*, 2003, **164**:157-163
- [13] Takabayashi J, Takahashi S, Dicke M, *et al.* Developmental stage of herbivore *Pseudaletia separata* affects production of herbivore-induced synomone by corn plants. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, **21**:273-287
- [14] Wei M (魏明), Deng X-J (邓晓军), Du J-W (杜家纬). Analysis and identification of *Liriomyza sativae*-attractants from cowpea and kidney bean volatiles. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16** (5):907-910 (in Chinese)
- [15] Maeda T, Takabayashi J, Yano S, *et al.* Effects of light on the tritrophic interaction between kidney bean plants, two-spotted spider mites and predatory mite, *Amblyseius womersleyi* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*, 2000, **24**:415-425
- [16] Rodriguez-Saona C, Crafts-Brandner SJ, Pare WP, *et al.* Exogenous methyl jasmonate induces volatile emissions in cotton plants. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, **27**:679-695
- [17] Gouinguéné SP, Turlings TCL. The effects of abiotic factors on induced volatile emissions in corn plants. *Plant Physiology*, 2002, **129**:1296-1307
- [18] Lou YG, Du MH, Turling TCJ, *et al.* Exogenous application of jasmonic acid induces volatile emissions in rice and enhances parasitism of *Nilaparvata lugens* eggs by the parasitoid *Anagrus nilaparvatae*. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, **31**:1985-2002
- [19] Lu H-Y (卢海燕), Liu F (刘芳), Bao S-W (包善微), *et al.* Effects of triazophos on the volatiles from rice plants infested by the *Cnaphalocrocis medinalis*. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2008, **22** (6):643-649 (in Chinese)
- [20] Cheng AX, Xiang CY, Li JX, *et al.* The rice (E)- β -caryophyllene synthase (OsTPS3) accounts for the major inducible volatile sesquiterpenes. *Phytochemistry*, 2007, **68**:1632-1641
- [21] Xu H-H (徐汉虹), Zhang Z-X (张志祥), Cha Y-G (查友贵). The prospect of botanical pesticides in China. *Pesticides* (农药), 2003, **42** (3):1-5 (in Chinese)
- [22] Nathan SS, Choi MY, Seo HY, *et al.* Effect of azadirachtin on acetylcholinesterase (AChE) activity and histology of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stal). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **70**:244-250
- [23] Kumar KM, Krishnaiah NV, Lingaiah T, *et al.* Effect on neem formulations on reproduction and oviposition of rice hoppers *Nilaparvata lugens*, *Sogatella furcifera* and *Nephotettix virescens*. *Pesticide Research Journal*, 2001, **13**:48-52
- [24] Krishnaiah NV, Kumar KM, Lingaiah T, *et al.* Effect of neem formulations on feeding of *Nilaparvata lugens*, *Sogatella furcifera* and *Nephotettix virescens* of rice. *Pesticide Research Journal*, 2001, **13**:235-238
- [25] Zhu S-D (祝树德), Gao Z-X (高振兴), Jin D-Q (金党琴), *et al.* Control effects and biological activity of azadirachtin on rice stem borer, *Chilo suppressalis* in paddy fields. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2004, **18** (6):551-556 (in Chinese)
- [26] Latha S, Daniel M. Allelopathic effects of social forestry trees, neem and Meliaon rice. *Geobios*, 2003, **30**:137-142
- [27] Xu D-J (徐德进). Studies on Bioactivities of Azadirachtin against Brown Planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal), and Its Safety Evaluation. EMBA Thesis. Yangzhou: Yangzhou University, 2005 (in Chinese)

作者简介 卢海燕,女,1982年生,博士研究生.主要从事昆虫化学生态学及害虫综合治理研究. E-mail:54521955@qq.com

责任编辑 张凤丽
