

水稻化感品种根分泌物中非酚酸类 化感物质的鉴定与抑草活性

孔垂华^{1,2,3}, 徐效华², 梁文举¹, 周勇军^{2,3}, 胡 飞³

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 南开大学元素有机化学国家重点实验室,
天津 300071; 3. 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642)

摘要: 水稻化感品种能从根系分泌释放化感作用物质, 长期以来, 酚酸类物质被认为是水稻根分泌的主要化感物质, 但这一结论常常被质疑。利用连续循环和直接树脂吸收两种方法采集典型的水稻化感品种 PI312777 幼苗的根分泌物, 并用液相色谱/质谱 (LC/MS) 联用技术鉴定了根分泌物中的非酚酸类物质。结果显示, 水稻 PI312777 幼苗根系能分泌释放 7-甲氧基羟基苯胺、羟基苯胺、3-异丙基-5-乙酰氧基环己烯酮-1、5,7,4'-三羟基-3',5'-二甲氧基黄酮、二萜内酯 A 和二萜内酯 B 6 个非酚酸类化合物。经液相色谱 (HPLC) 定量分析, 这些化合物在水稻生长 10d 的根分泌物中的浓度为 5~19 $\mu\text{mol/L}$ 。进一步的生测结果显示, 这些化合物在其释放的浓度范围能对稻田常见的稗草和异型莎草有抑制活性, 尤其是这些化合物的等摩尔混合物的抑草活性增加, 同时水稻根分泌物的抑草活性与土壤载体显著相关。表明羟基苯胺、环己烯酮、黄酮和二萜内酯四类非酚酸类物质是水稻的主要化感物质, 这与近期愈来愈多的研究结果一致。

关键词: 水稻; 化感作用; 根分泌物; 非酚酸类化感物质; 抑草活性; 液相色谱/质谱

Non-phenolic allelochemicals in root exudates of an allelopathic rice variety and their identification and weed-suppressive activity

KONG Chui-Hua^{1,2,3}, XU Xiao-Hua², LIANG Wen-Ju¹, ZHOU Yong-Jun^{2,3}, HU Fei³ (1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; 2. *State Key Laboratory of Elemento-organic Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China*; 3. *Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1317~1322.

Abstract: Rice (*Oryza sativa* L.) production is often characterized by a heavy application of herbicides, which may cause environmental problems, while rice allelopathy can potentially be used to improve weed management. This allelopathy can be achieved by the allelochemicals produced by released from living rice roots. Therefore, searching for the allelochemicals from rice has been extensively studied. A range of phenolic acids, such as *p*-hydroxybenzoic, vanillic, *p*-coumaric and ferulic acids, were identified as the primary allelochemicals in rice root exudates but are unlikely to explain rice allelopathy, since their concentrations in soil never reach phytotoxic levels. More recently, an increasing number of studies have shown that some flavones, diterpenes, and other types of compounds are potent allelochemicals in rice. In this study, non-phenolic allelochemicals 7-methoxyhydroxamic and hydroxamic acids, 3-isopropyl-5- acetoxycyclohexene-2-one-1, momilactone A, momilactone B, and 5,7,4'-trihydroxy-3',5'-dimethoxyflavone, were identified from the root exudates of an allelopathic rice accession PI312777 by means of LC/MS. Further studies with continuous root exudates trapping system (CRETS) and direct resin adsorption methods showed that these compounds were released from the living roots of PI312777 seedling after 10 days of its transplanting, and their concentrations were ranged from 5~19 $\mu\text{mol/L}$ by HPLC quantitative analyses. Bioassays

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金项目 (30070130); 国家十五科技攻关项目 (2001BA509B07)

收稿日期: 2004-02-20; **修订日期:** 2004-04-25

作者简介: 孔垂华 (1962~), 男, 安徽省铜陵市人, 博士, 研究员, 主要从事化学生态学研究。E-mail: kongch@mail.edu.cn

Foundation item: Hundreds-Talent Program of Chinese Academy of Sciences, National Natural Science Foundation of China (No. 30070130), The National “Tenth Five-Year Plan” Key Program of Science and Technology (No. 2001BA509B07)

Received date: 2004-02-20; **Accepted date:** 2004-04-25

Biography: KONG Chui-Hua, Ph. D., Professor, mainly engaged in chemical ecology. E-mail: kongch@mail.edu.cn

indicated that all of these compounds at their released concentrations could inhibit the growth of weeds *Echinochloa crus-galli* and *Cyperus difformis* associated with rice, and their equimolar mixtures had a much stronger inhibitory activity than their individuals. In addition, the weed-suppressive activity of these compounds was varied with the media of bioassays. It was much stronger in pot culture with soil than in Petri dish with filter paper, suggesting that microorganisms could biodegrade root exudates, and hence, the weed-suppressive activity of the allelochemicals were enhanced. This study also showed that the concentrations of non-phenolic allelochemicals in rice root exudates were obviously depended on collection methods, suggesting that how to trap and identify the active allelochemicals in rice root exudates should be the priority in the future research on rice allelopathy. So far, there has been limited success in finding allelochemicals which can really explain the allelopathic action in the field. Therefore, it is needed to further clarify the chemical principles and release mechanisms of rice allelochemicals.

Key words: *Oryza sativa*; allelopathy; root exudates; non-phenolic allelochemical; weed-suppressive activity; LC/MS

文章编号:1000-0933(2004)07-1317-06 中图分类号:Q948,S314 文献标识码:A

化感作用是植物通过合成并释放特定的化学物质而实现的^[1],这样化感物质是这一研究领域的中心问题。许多作物及相应的品种具有化感作用^[2],揭示并充分利用作物的化感作用功能可以为生态安全条件下的农田杂草控制开拓一条新的途径。水稻(*Oryza sativa*)是主要粮食作物之一,因而水稻化感作用及相应的化感物质一直被广泛地关注和研究^[3~7]。水稻主要是通过根系分泌释放化感作用物质^[7],长期以来一直认为水稻根系分泌物中的羟基苯甲酸、香草酸、香豆酸和阿魏酸等酚酸类物质是主要的化感物质^[8~10],但这一结论常常被质疑。主要的原因是几乎所有的作物都能从根系分泌这些酚酸,而且水稻根分泌的酚酸在田间也达不到显示化感效应所需的浓度^[11]。近年,愈来愈多的研究显示^[5,12~14],水稻能从根系分泌释放黄酮、二萜内酯、羟基脂肪酸和环己烯酮等其它类型的化感物质。这些化感物质对水稻杂草有较高的抑制活性,但它们在水稻根分泌物中的含量较低,采用常规的方法往往难以捕获鉴定。本文主要报道用液相色谱/质谱(LC/MS)联用技术鉴定水稻根分泌物中非酚酸类化感物质的方法,并评价这些物质在释放浓度范围对稻田常见稗草(*Echinochloa crus-galli*)和异型莎草(*Cyperus diffeormis*)的抑制活性,同时就相关问题展开讨论。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

受试水稻选用国内外公认的化感材料 PI312777^[1~16],其种子来源于美国 USDA-ARS 种质资源库;稗草和异型莎草种子从稻田中采集;黄酮、二萜内酯、环己烯酮和羟基脂肪酸按文献^[5,17,18]方法从 PI312777 幼苗叶中分离提取;高效液相色谱(HPLC)为惠普公司 HP-1100 型;液相色谱/质谱(LC/MS)联用仪为 Finigan 公司的 TSQ7000 型;微固相萃取柱(反相 C18 Sep-Pak)和 XAD-8 高分子树脂分别购自 Waters 和 Aldrich 公司。

1.2 水稻根分泌物的采集

水稻根分泌物用连续循环和直接树脂吸收两种方法采集,两种方法均操作 3 次,每次代表 1 个重复。

1.2.1 连续循环树脂吸收^[19] 该方法主要采用连续根分泌物捕集系统(Continuous Root Exudates Trapping System, CRETS),将 5 株均匀根长和苗高的 3 叶期 PI312777 幼苗移栽于 CRETS 的培养盆中,培养盆和盛有 Hoagland 营养液的盆中间连接一个装填 XAD-8 树脂的柱(2cm×20cm)。开动循环泵,水稻幼苗在 CRETS 中培养 10d。实验结束时,取下 XAD-8 柱,先后用蒸馏水和甲醇淋洗,甲醇淋洗液低温减压除去溶剂,得根分泌物。

1.2.2 直接树脂吸收 在烧杯(9cm×7cm)中装入 XAD-8 树脂、1mmol/L 的 Mes-Tris 缓冲液(pH5.5)和 0.5mmol/L 的 CaSO₄ 溶液,溶液和树脂总体积控制在 300ml。5 株长势均匀的 3 叶期 PI312777 幼苗移栽至烧杯中,烧杯放入培养箱在 25±1℃ 和 12h 光照条件下生长。10d 后从烧杯中的树脂取出水稻幼苗,并仔细清除树脂中的水稻根组织,然后烧杯中的树脂和溶液倒入 5cm×20cm 的玻璃柱中。待柱中溶液流尽后,先用蒸馏水洗柱,再用甲醇淋洗,甲醇淋洗液低温减压除去溶剂,得根分泌物。

1.3 水稻根系分泌物中化感物质分析

按“1.2”方法采集的水稻根系分泌物均分别用 10ml 50% 的甲醇水溶液溶解,抽滤后的滤液加入反相 C₁₈ Sep-Pak 微固相萃取柱中。萃取柱先后用水和甲醇(5ml×3ml)淋洗,合并的甲醇淋洗液用氮气浓缩至 1ml 备测 HPLC 和 LC/MS。

水稻根分泌物中非酚酸类化感物质首先在 LC/MS 仪上进行定性分析。测定条件如下:色谱柱为 C18 反相柱(Hypersil 125nm×4nm,5μmol/L),色谱流动相为 80%乙腈和 20%的 1%乙酸水溶液的混合溶剂,流速为 0.5ml/min,紫外检测波长 320nm。质谱采用大气压化学电离(Atmospheric Pressure Chemical Ionization,APCI)方式,氮作为碰撞气体。质谱滞留时间为 500ms,持续时间为 0.1s,停顿时间 5min。所有测试均在负离子质谱模式下进行,并采用多重反应监测方式(Multiple Reaction Monitoring Mode,MRM)检测相关的离子。

水稻根分泌物中非酚酸类化感物的定量分析采用内标法在 HPLC 仪上进行。HPLC 测定条件与 LC/MS 测定时的色谱条件基本相同,只是流动相流速增加至 1.5ml/min。化感物质的量从预先设定的各自物质的浓度和色谱峰面积的标准曲线中换算。

1.4 生物活性测定

水稻根分泌物及其中鉴定的黄酮、二萜内酯、环己烯酮和羟基脲酸分别对稻田两个常见的稗草和异型莎草进行生物活性测定。测定分别在培养皿和盆栽两种条件下进行。

1.4.1 培养皿生物活性测定^[14] 在直径 9cm 的培养皿底部垫入一层滤纸,然后加入设定浓度的水稻根分泌物或各种鉴定的化感物质水溶液,另设只加蒸馏水的培养皿为对照。预先萌发的受试稗草或异型莎草种子,以每皿 50 粒均匀播入培养皿中,培养皿放入培养箱在 25±1℃和 12h 光照条件下生长 7d。收获各培养皿中的幼苗在 80℃,12h 条件下干燥后称取干重。

1.4.2 盆栽生物活性测定^[17,20] 50 粒稗草或异型莎草种子均匀播入含 150g 水稻土的盆(5cm×7cm)中,待出苗后,每盆间苗至 10 株,并向盆中施入设定浓度的水稻根分泌物或各种鉴定的化感物质水溶液,对照则只加蒸馏水。盆放入培养箱在 25±1℃和 12h 光照条件下生长 14d。幼苗收获后,从根苗分界处剪切,地上部在 80℃,24h 条件下干燥后称取干重。

两种条件下的生测均针对不同的受试杂草和处理溶液设置 3 个重复,抑制率为在相同条件下处理相对于对照幼苗干重的百分数。

所有数据均用 SPSS10.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水稻根分泌物中的非酚酸类化感物质

LC/MS 结果显示(图 1),水稻化感品种 PI312777 幼苗根分泌物出现 6 个可辩的色谱峰,经双质谱聚集,6 个色谱峰的负离子质谱的最大荷质比(M/Z)分别为:峰 1,210;峰 2,180;峰 3,195;峰 4,329;峰 5,329;峰 6,313。这些分别是羟基脲酸、环己烯酮、黄酮和二萜内酯的[M-H]⁻分子离子峰,进一步分析这些色谱峰的其它离子碎片,推断 6 个色谱峰代表的化合物分别为峰 1,7-甲氧基羟基脲酸(C₉H₉O₅N,M211)、峰 2,羟基脲酸(C₈H₇O₄N,M181)、峰 3,3-异丙基-5-乙酰氧基环己烯酮-1(C₁₁H₁₆O₃,M196)、峰 4,5,7,4'-三羟基-3',5'-二甲氧基黄酮(C₁₇H₁₄O₇,M330)、峰 5,Momilactone B(C₂₀H₂₆O₄,M330)和峰 6,Momilactone A(C₂₀H₂₆O₃,M314),它们的结构式见图 2。

虽然水稻的这些次生物质能从根部释放到环境中,但它们的释放浓度必须达到能启动对稻田杂草有抑制活性的水平,才能是主要的化感作用物质。这样,本研究进一步借助 HPLC 方法,对水稻根分泌释放的这些化合物进行定量分析。结果表明,这些化合物在水稻根分泌 10d 后,释放的浓度在 5~19 μmol/L 范围内,而且直接树脂吸收方法比 CRETS 方法采集得到更多的水稻根分泌物及这些非酚酸类化合物(表 1)。

2.2 水稻根分泌物中非酚酸类化感物质的活性

水稻根分泌物能从根系释放一定浓度的非酚酸类的黄酮、羟基脲酸、环己烯酮和二萜内酯,这些物质只有在释放

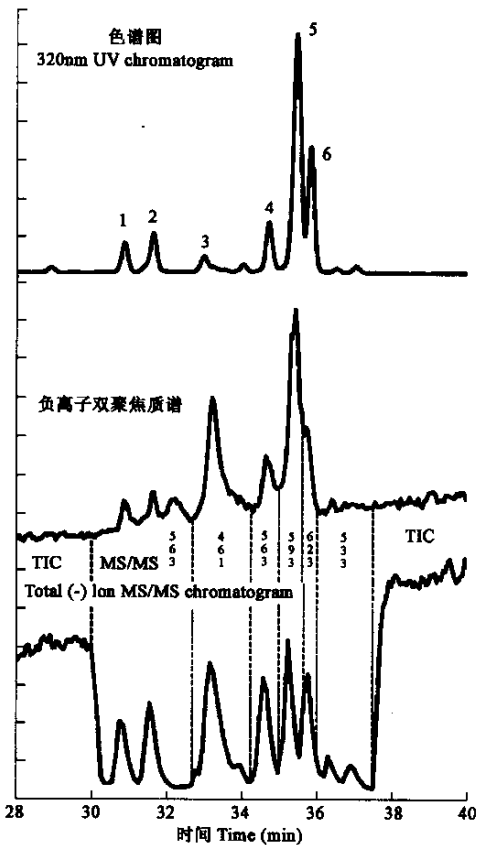


图 1 水稻根分泌物的 LC/MS 谱图
Fig.1 Chromatograms of LC/MS for rice root exudates

表 1 水稻根分泌物中非酚类化感物质的浓度 (μmol/L)

Table 1 The concentration of non-phenolic allelochemicals from rice root exudates (μmol/L)

化感物质 Allelochemical	连续循环吸收 CRETS	直接吸收 Direct adsorption
7-甲氧基羟基脲酸 7-Methoxydroxamic acid	5.1±0.9a	9.2±1.1b
羟基脲酸 Hydroxamic acid	6.2±0.6a	11.3±1.7b
环己烯酮 Cyclohexenone*	4.7±0.9a	6.8±0.7b
黄酮 Flavone**	7.8±1.1a	13.2±1.2b
二萜内酯 B Momilactone B	13.9±1.7a	18.7±2.9b
二萜内酯 A Momilactone A	10.6±15a	15.6±2.3b
根分泌物 Root exudates (mg/5plants)	109.1±21a	171.6±32b

* 3-异丙基-5-乙酰氧基环己烯酮-1, 3-isopropyl-5-acetoxycyclohexene-2-one-1; ** 5,7,4'-三羟基-3',5'-二甲氧基黄酮, 5,7,4'-trihydroxy-3',5'-dimethoxyflavone; 同行数据不同字母表示在 0.05 水平下显著 Data with different letter mean different at 0.05 level

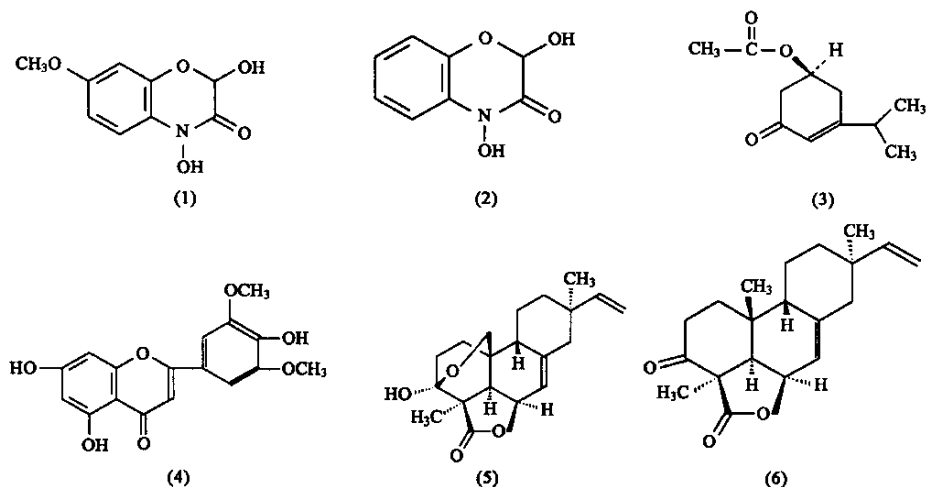


图 2 水稻根分泌物中非酚类化感物质的结构

Fig. 2 Structures of non-phenolic allelochemicals from rice root exudates

的浓度范围内能对稻田杂草有抑制活性,才有可能在田间显示化感效应。生测结果表明,这些化合物在所释放的浓度范围都不同程度地抑制稗草和异型莎草的生长,尤其是它们等摩尔混合物的抑制活性显著增强(表 2)。有趣的是,这些物质在盆栽土壤生测条件下的抑制活性明显低于培养皿条件下的生测(表 2),这应与土壤降低了这些化感物质的有效浓度有关。进一步实验发现,包含这些化感物质的水稻根分泌物在培养皿生测条件下抑制活性较低,但在盆栽土壤生测条件下的抑制活性显著增强(图 3)。很显然,这与盆栽生测条件下的土壤载体有关。在培养皿生测条件下,根分泌物中的营养物质可以较长时间存在,而在土壤生测条件下,这些营养物质可以在土壤微生物及其它生物和非生物因子的作用下消耗或降解,这样导致它们对化感物质的拮抗作用降低而使化感物质能对杂草表现抑制性。

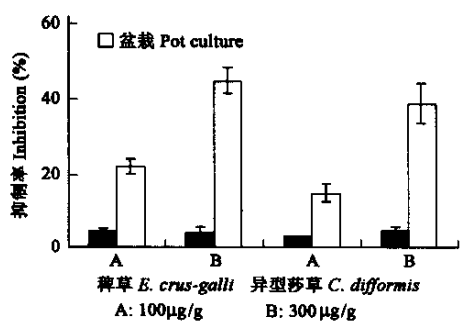


图 3 水稻根分泌物在不同生测条件下对稗草和异型莎草的抑制性

Fig. 3 Inhibition of rice root exudates on *E. crus-galli* and *C. difformis* under different bioassays

表 2 水稻根分泌物的非酚类化感物质对稗草和异型莎草的抑制性(%)

Table 2 Inhibition of non-phenolic allelochemicals from rice root exudates on *E. crus-galli* and *C. difformis* (%)

化感物质 Allelochemical	浓度* Concentration(μmol/L)	稗草 <i>E. crus-galli</i>		异型莎草 <i>C. difformis</i>	
		培养皿 Petri dish	盆栽 Pot culture	培养皿 Petri dish	盆栽 Pot culture
7-甲氧基羟基肟酸 7-Methoxydroxamic acid	5	5.2±0.7a	3.3±0.5b	7.6±1.5c	5.7±1.9a
羟基肟酸 Hydroxamic acid	10	6.3±1.1a	5.1±1.0ab	9.1±1.3c	8.6±2.4c
环己烯酮 Cyclohexenone	5	3.5±0.6a	2.0±0.4b	2.2±0.7b	2.0±0.6b
黄酮 Flavone	10	15.9±2.0a	11.9±1.8b	19.3±2.6c	15.9±2.9a
二萜内酯 B Momilactone B	15	19.9±3.1a	14.6±2.5b	15.8±3.1b	11.8±2.4c
二萜内酯 A Momilactone A	15	27.1±3.4a	20.9±3.1b	20.6±3.2b	19.4±2.7b
等摩尔混合物** Equimolar mixture	12	47.2±8.1a	40.9±5.3a	39.3±5.8ab	33.5±2.8b

* 以表 1 中各化感物质释放的浓度范围为基准 Based on the concentrations of each allelochemical released from rice root exudates on table 1; ** 6 个化感物质均为 2 μmol/L 浓度的混合物(总浓度 12 μmol/L) The mixture of 6 allelochemicals with 2 μmol/L (a total of 12 μmol/L); 其它标注同表 1 下标 Other remarks were the same as table 1 footnotes

3 讨论

本研究为水稻化感材料 PI312777 幼苗能从根系分泌释放对稻田杂草有抑制活性浓度的非酚酸类黄酮、环己烯酮、羟基肟酸和二萜内酯物质,这些化合物均已被报道存在于部分水稻品种的茎叶或种壳中^[17,21],最近发现其中一些能从水稻化感品

种根系分泌释放^[5,12,14,17]。本研究进一步确证这些化合物均可从水稻根系分泌释放,表明它们是潜在的化感作用物质。这一结果和近期关于酚酸不是水稻主要化感作用物质的结果一致^[5,11~14,17]。长期以来酚酸一直被认为在化感作用中起重要作用^[26],国内外也有大量关于酚酸是作物化感或自毒作用的主要物质的报道,虽然水稻根系释放酚酸,但它们释放的浓度并不能达到对稻田杂草抑制的浓度^[11],许多关于水稻或其它作物根系分泌酚酸对杂草的抑制活性的结果都是在人为设定浓度下的生测结果,很少有定量的研究。水稻和其它作物根系分泌的酚酸也许在与土壤金属离子及根际微生物作用等方面起作用,但不应是产生化感效应的主要因子^[18]。最新的研究显示,就活体水稻根分泌途径而言,释放的酚酸对化感效应几乎没有价值,但水稻植株腐解产生的酚酸在化感作用中占有中心位置,而且水稻植株腐解释放的酚酸种类和浓度与水稻是否为化感品种无关,而与水稻品种木质素的含量和组成有关,这表明水稻,包括其它作物腐解释放的酚酸主要来源于木质素。

本研究也显示水稻幼苗 PI312777 根系分泌物及非酚酸类化感物质的浓度与采集方法相关,这不奇怪,目前国内外尚没有权威可靠的根分泌物采集方法,尤其是如何从活体植物根系采集分泌物并及时捕获鉴定其中的微量活性物质还没有突破性进展。本研究采用连续循环和直接树脂吸收方法采集水稻根分泌物及用 LC/MS 联用技术鉴定化感物质的方法也有其局限性。就 LC/MS 联用技术而言^[27],因目前液相色谱仪大多采用紫外监测器,这样将许多不能显示紫外吸收的有机物,如糖及饱和有机物排除在外,因而液相色谱仪上显示的色谱峰并不能代表所测样品的全部化学成份。尤其是 LC/MS 的质谱解析需要较强的专业背景,而且目前的 LC/MS 并不象 GC/MS(气相色谱/质谱)那样有质谱库供参考,这就更增加了难度。但对作物根分泌物研究来说,LC/MS 仍是最合适的仪器。前期大量采用 GC/MS 联用技术研究作物根分泌物,因根分泌物是亲水性且不易挥发,GC/MS 的结果总是被质疑,即使采用衍生化的方法增加根分泌物中化学成份的挥发性来测定 GC/MS,但可以想象,在强酸碱和高温条件下根分泌物中活性的有机物结构差不多已面目全非了。因此,LC/MS 目前虽然难度较大,且费用也较高,但却是水稻或其它作物根分泌物化学成份鉴定难以替代的仪器。

本研究还发现水稻根分泌物对稻田杂草的抑制活性与土壤载体相关,事实上,水稻根分泌物中含有各种次生物质,除了上述的非酚酸类化感物质,还含有大量的糖、氨基酸、细胞分裂素和酚酸等^[22~25],其中糖和氨基酸都是营养物质,它们的存在可以拮抗水稻根分泌物中的化感物质对杂草的抑制作用。这表明水稻根分泌物中的化感物质需要与土壤的生物和非生物因子发生作用才能显示化感效应。因此,要确定水稻或其它作物的化感作用物质,不仅要证明它们能够以抑制活性浓度释放到环境,而要考虑它们与土壤等环境因子的作用。这样,相关水稻释放化感物质的机制和与土壤因子的作用关系需要进一步的研究。

References:

- [1] Kong C H, Hu F. *Allelopathy and Its Application*. Beijing: China Agricultural Press, 2001. 3~5.
- [2] Kong C H, Hu F, Chen X H, *et al.* Assessment and utilization of allelopathic crop varietal resources. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**:1159~1164.
- [3] Wang D L. A review on allelopathy of rice. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(3):326~334.
- [4] Kong C H, Hu F, Zhang C X, *et al.* Inducible effects of methyl jasmonate on allelochemicals from rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2):177~180.
- [5] Kong C H, Xu X H, Hu F, *et al.* Using specific secondary metabolites as markers to evaluate allelopathic potentials of rice varieties and individual plants. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, **47**: 839~843.
- [6] Kim K U, Shin D H, Eds. *Rice Allelopathy*, Taegu (Korea): Kyungpook National University, 2000. 1~5.
- [7] Olofsdotter M, Jensen L B, Courtois B. Improving crop competitive ability using allelopathy-an example from rice. *Plant Breeding*, 2002, **121**:1~9.
- [8] Chung I M, Ahn J K, Yun S J. Identification of allelopathic compounds from rice (*Oryza sativa* L.) straw and their biological activity. *Can. J. Plant Sci.*, 2001, **81**: 815~819.
- [9] Kim J T, Kim S H. Screening of allelochemicals on barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) and identification of potentially allelopathic compounds from rice (*Oryza sativa*) variety hull extracts. *Crop Protection*, 2002, **21**: 913~920.
- [10] Rimando A M, Olofsdotter M, Dayan F E, *et al.* Searching for rice allelochemicals: An example of bioassay-guided isolation. *Agron. J.*, 2001, **93**: 16~20.
- [11] Olofsdotter M, Rebulanan M, Madrid A, *et al.* Why phenolic acids are unlikely primary allelochemicals in rice. *J. Chem. Ecol.*, 2002, **28**: 229~241.
- [12] Kato-Noguchi H, Ino T, Sata N, *et al.* Isolation and identification of a potent allelopathic substance in rice root exudates. *Physiol. Planta* 万卉数据: 401~405.
- [13] Lee C W, Yoneyama K, Takeuchi Y, *et al.* Momilactones A and B in rice straw harvested at different growth stages. *Biosci. Biotechnol.*

Biochem., 1999, **63**: 1318~1320.

- [14] Kato-Noguchi H, Ino K. Rice seedlings release momilactone B into the environment. *Phytochemistry*, 2003, **63**: 551~554.
- [15] Dilday R H, Lin J, Yan W. Identification of allelopathy in the USA-ARS rice germplasm collection. *Aust. J. Exp. Agric.*, 1994, **34**: 907~910.
- [16] Zhu H L, Kong C H, Hu F, *et al.* Evaluation methods for allelopathic potentials of rice germplasms. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, **36**: 788~792.
- [17] Kong C H, Xu X H, Zhou B, *et al.* Two compounds from allelopathic rice accession and their inhibitory effects on weeds and fungal pathogens. *Phytochemistry*, 2004, **65**: 1123~1128.
- [18] Hu F, Kong C H, Xu X H, *et al.* Weed-suppressive effect and its mechanism of allelopathic rice variety. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, **37**: 923~927.
- [19] Tang C S, Young C C. Collection and identification of allelopathic compounds from the undisturbed root system of *Bigaltea Limpograss* (*Hemarthria altissima*). *Plant Physiol.*, 1982, **69**: 155~160.
- [20] Weidenhamer J D, Hartnett D C, Romeo J T. Density-dependent phytotoxicity: distinguishing resource competition and allelopathic interference in plants. *J. Appl. Ecol.*, 1989, **26**: 613~624.
- [21] Kato T, Tsunakawa M, Sasaki N. Growth and germination inhibitors in rice husks. *Phytochemistry*, 1977, **16**: 45~48.
- [22] Bacilio-Jimenez M, Aguilar-Flores S, Ventura-Zapata E, *et al.* Chemical characterization of root exudates from rice (*Oryza sativa*) and their effects on the chemotactic response of endophytic bacteria. *Plant Soil*, 2003, **249**: 271~277.
- [23] Murofushi N, Inoue A, Watanabe N, *et al.* Identification of cytokinins in root exudates of the rice plant. *Plant Cell Physiol.*, 1983, **24**: 87~92.
- [24] Yoshida R, Oritant T, Nishi A. Kinetin-like factors in the root exudates if rice plants. *Plant Cell Physiol.*, 1971, **12**: 89~94.
- [25] Kato-Noguchi H, Ino K. Assessment of allelopathic potential of root exudates of rice seedlings. *Biol. Planta.*, 2001, **44**: 635~638.
- [26] Inderjit. Plant phenolics in allelopathy. *Bot. Rev.*, 1996, **62**:186~202.
- [27] Kong C H, Xu X H. *Isolation and Identification of Organic Compounds*. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 353~363.

参考文献:

- [1] 孔垂华, 胡飞. 植物化感(相生相克)作用及其应用. 北京:中国农业出版社, 2001. 3~5.
- [2] 孔垂华, 胡飞, 陈雄辉, 等. 作物化感品种资源的评价利用. 中国农业科学, 2002, **35**:1159~1164.
- [3] 王大力. 水稻化感作用研究综述. 生态学报, 1998, **18**(3):326~334.
- [4] 孔垂华, 胡飞, 张朝贤, 等. 茉莉酮酸甲酯对水稻化感物质的诱导效应. 生态学报, 2004, **24**(2):177~180.
- [5] 孔垂华, 徐效华, 胡飞, 等. 利用特征次生物质为标记评价水稻品种和单植株的化感潜力. 科学通报, 2002, **47**:203~206.
- [16] 朱红莲, 孔垂华, 胡飞, 等. 水稻品种资源化感潜力的评价方法, 中国农业科学, 2003, **36**:788~792.
- [18] 胡飞, 孔垂华, 徐效华, 等. 水稻化感材料的抑草作用及其机制. 中国农业科学 2004, **37**:923~927.
- [27] 孔垂华, 徐效华. 有机物的分离和结构鉴定, 北京:化学工业出版社, 2003. 353~363.