

甘肃沿黄灌区连作马铃薯根区 土壤有机物 GC-MS 分析

沈宝云^{1,2}, 李朝周^{1,3}, 余 斌¹, 张俊莲¹, 王 蒂¹,
白江平¹, 王 文², 康小华², 王海龙²

(1. 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃条山集团, 甘肃 白银 730400;

3. 甘肃农业大学生命科学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 对轮作(前3 a均种植玉米)和连作(连续4 a种植马铃薯)条件下马铃薯“大西洋”品种出苗期和落花期根区土壤溶液进行 GC-MS 测定, 研究连作逆境下马铃薯根系分泌物的自毒物质。结果发现, 两种根区土壤溶液中匹配度 80% 以上的有机物均检测出炔、苯、酸、醇、酯、醛、酮、酰胺及其衍生物, 其中出苗期有 13 种有机物是连作土壤溶液中独有物质, 且含量最高的是丙酸丙酯(22.335%), 最低的是 2-十一烯醛(0.258%)。落花期连作土壤溶液中新增有机化合物 7 种, 其中十六烷酸丙基酯也称棕榈酸丙基酯是植物自毒物质。比出苗期和落花期两种土壤溶液有机物, 确定 12 种化合物[壬烷、丙酸丙酯、辛醛、二丁基羟基甲苯、1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯、2,6-二甲基壬烷、2-辛烯醛、2-十一烯醛、1-十二烯、1-十三烷醇、1-十五碳烯、5-十八烯]不是马铃薯自毒化合物。落花期连作土壤溶液中独有的 N,N-二甲基甲酰胺化合物也是出苗期连作土壤独有物质, 其浓度为 0.455% (出苗期)和 0.699% (落花期), 该物质是否为自毒物质尚需进一步研究。

关键词: 马铃薯; 轮作; 连作; 土壤有机物; GC-MS 分析

中图分类号: S153.6⁺2; S532 **文献标志码:** A

GC-MS analysis of rhizosphere soil organic compounds of potato field under continuous cropping in the Yellow River irrigation region of Gansu Province

SHEN Bao-yun^{1,2}, LI Chao-zhou^{1,3}, YU Bin¹, ZHANG Jun-lian¹, WANG Di¹, BAI Jiang-ping¹,
WANG Wen², KANG Xiao-hua², WANG Hai-long²

(1. Gansu Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Tiaoshan Agricultural, Industrial and Commercial (Group) Co., Ltd., Baiyin, Gansu 730400, China;

3. College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To identify the potato root secreted auto-toxicity compounds under continuous cropping, soil solutions from four years continuous cropping field and three years potato/maize rotation field during seedling and flowering stage were analyzed by the GC-MS. About 80% of organic compounds from both samples contained hydrocarbons, benzenes, acids, alcohols, esters, aldehydes, ketones, amides and the derivatives of hydrocarbons. Among these chemicals 13 kinds were only detected from the soil sampled at the seedling stage of continuous cropping. The highest and lowest abundance of chemicals were detected for n-propyl propionate(22.335%) and 2-undecenal(0.258%), respectively. Additional seven kinds of chemicals were detected from the soil sample at flowering stage, the palmitic acid isopropyl ester was identified as one of the plant auto-toxicities. Compared with flowering stage, seedling stage had twelve chemicals identified as non auto-toxicity of the potato plant, including n-nonane, n-propyl propionate, capryl aldehyde, butylated hydroxytoluene, dimethyl, 2-benzenedicarboxylate, 2,6-dimethylnonane, 2-octenal, 2-undecenal, 1-dodecene, 1-tridecanol, 1-pentadecan and 5-octadecylene. Although N,N-dimethyl-formamide was detected during both seedling and flowering stages, with the concentration being 0.445% and 0.669%, respectively, their role still await further investigation.

Keywords: potato; rotation; continuous cropping; soil organic compounds; GC-MS analysis

收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAD06B03)

作者简介: 沈宝云(1965—), 男, 甘肃景泰人, 博士, 高级农艺师, 主要从事马铃薯育种及栽培研究。E-mail: baoyunshen@126.com。

通信作者: 张俊莲(1961—), 女, 山西代县人, 教授, 主要从事马铃薯育种及栽培研究。E-mail: zhangjunlian77@163.com。

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是仅次于水稻、小麦、玉米的世界第四大作物。中国是世界马铃薯生产大国, 种植面积和总产量均位居世界第一位。近年来, 随着马铃薯产业的快速发展, 一些如干旱缺水、连作逆境、贮藏生理研究不足导致烂窖率较高等问题相继产生, 其中连作障碍问题已成为影响我国马铃薯主产区生产的重要制约因素之一。研究者已对连作田土壤养分、理化性质、微生物区系、防控措施等进行了一些研究^[1-6]。有研究者认为, 化感作用是植物连作障碍的主要原因^[6-9]。Uren 和 Reisenauer^[10]在前人工作的基础上, 总结出根释放物质的种类及组成, 其中渗出物有糖类、有机酸、氨基酸、水、无机离子、氧气、维生素等; 排泄物有 CO_2 、 HCO_3^- 、质子、乙烯等; 分泌物有粘液、质子、酶类、铁载体、激素、化感物质(酚类物质)以及脱落物, 脱落物包括根冠细胞、细胞内含物、根毛等; Qasen 和 Foy^[11]进一步研究认为, 根系分泌物主要有三大类, 即大分子有机物(糖、蛋白质、酶和凝胶等), 小分子酸、酚和酮等, 以及生长激素、黄酮和甾类等。有关马铃薯连作根系分泌物中有机化合物种类的研究鲜见报道。本研究对正常轮作和连作 3 a 的马铃薯根区土壤有机物成分进行了气相色谱-质谱联用仪(Gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)鉴定, 以期研究连作条件下马铃薯根系分泌物, 为深入解读马铃薯连作化感自毒作用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验基地为甘肃省中部地区的景泰县条山集团马铃薯连作试验基地。地理坐标处于东经 $103^{\circ}33'$ ~ $104^{\circ}43'$, 北纬 $36^{\circ}43'$ ~ $37^{\circ}38'$ 之间, 境内海拔 1 274 ~ 3 321 m, 属温带大陆干旱气候, 年平均气温 8.2°C , 无霜期 141 d 左右。年平均降水量 185.6 mm, 年平均蒸发量 1 722.8 mm。年平均日照时数 2 713 h, 全县光热资源丰富, 日照百分率 62%, 太阳年平均辐射量 $618.4 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的年活动积温 $3\,614.8^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $3\,038^{\circ}\text{C}$, 是我国除青藏高原外光热资源最丰富的地区之一。试验基地供试土壤为灰钙土, 质地为砂壤。试验基地海拔 1 640 m, 有充足的水源和良好的农业灌溉条件。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 供试土样和品种 选择轮作(前 3 a 均种植玉米)和连作 3 a(连续 4 a 种植马铃薯)的农田土壤 0 ~ 25 cm 为试验土, 马铃薯为“大西洋”品种一级种。

1.2.2 试验处理 选 45 ~ 50 g 健康整种薯 60 粒,

用 0.3% 高锰酸钾溶液浸种 5 min, 晾干备用。用自来水冲洗干净的化肥外包装袋(50 kg)为栽种器皿(下有托盘), 每袋装土 17 kg 和硫酸钾复合肥 25 g ($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 15:15:15$), 肥料和土混合均匀, 直立放置。播种前, 每袋在距离种薯下方 8 cm 处倾斜埋入土壤溶液取样器(Rhizon soil moisture sampler, Rhizon SMS)^[12]1 支, 取液管口在土面上 5 cm, 用塑料套封口(避免杂物污染)。袋底和距袋底 6 cm 的两侧各打 3 个直径 1.5 cm 小孔, 在袋的下托盘中首次浇自来水 4 L, 水分通过袋底和侧面小孔向上渗透浸湿袋内土壤, 以后每 4 ~ 10 d 根据墒情每盘浇水 3.5 L。第一次浇水 4 d 后, 开始播种, 每袋播 1 粒, 播深 12 cm, 播后覆黑色薄膜(出苗时需放苗), 轮作和连作土壤各种 10 袋, 重复 3 次。

1.3 样品采集与测定

播后 25 d(出苗期)和 80 d(落花期), 每个处理分别抽取轮作和连作土壤溶液各 5 袋(抽液时前一天下午每袋浇水 5 L)。抽液时将 60 mL 医用注射器口(不用金属针头)插入每袋预留的土壤溶液取样管口, 抽空取样器内气体, 然后用 8 cm 长的木条块对称固定注射器(防止注射器复位), 保持取样器内负压状态。10 min 后注射器开始抽出土壤溶液, 将最初抽出的 10 mL(约抽 30 min)溶液丢弃(避免器材干扰)。重新安装注射器取样, 约 3 h 每只注射器可抽取 40 ~ 50 mL 土壤溶液(取液时用黑色塑料盖住注射器, 避免见光)。每袋抽一次, 分别混合轮作和连作土壤溶液, 装入棕色瓶中并用黑色塑料袋包装, 当日送样到甘肃农业大学测试中心进行 GC-MS 测定。

采用 Agilent GC(6890)-MS(5973)仪器进行定性定量测定。具体方法是: 将收集到的土壤溶液取 100 mL 萃取后用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 真空旋转蒸发仪 35°C 下浓缩至 1 mL, 进行 GC-MS 进样检测。色谱柱: ov1701 $60 \text{ m} \times 0.25 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ 。色谱条件: 50°C 1 min, $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 220°C , 40 min 进样口 260°C 不分流, 流速 $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 氦气。质谱条件: 四级杆 150 度, 离子源 230 度扫描 m/z 15 ~ 550, 70 eV 。进样量 $1 \mu\text{L}$ 。应用 NIST 质谱数据库, 通过计算机检索系统进行未知物的鉴定。

2 结果与分析

2.1 轮作和连作条件下出苗期马铃薯根区土壤有机物鉴定结果

轮作和连作条件下, 出苗期马铃薯根区土壤溶液测定结果见图 1 和图 2。与数据库化合物匹配分

析,发现两种土壤溶液中匹配度在 80% 以上的有机 酮,酰胺及其烃的衍生物(表 1)。
物种类均超过 40 种,均检出烃、苯、酸、醇、酯、醛、

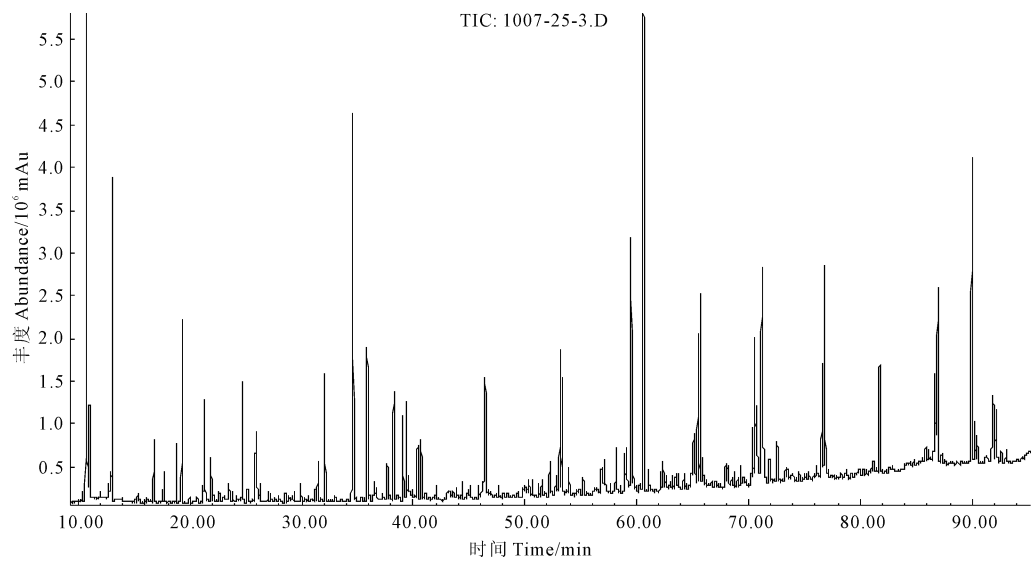


图 1 轮作马铃薯出苗期根区土壤有机物 GC - MS 图谱

Fig.1 GC - MS profile of soil organic compounds of potato rhizosphere from rotation cropping field during the seedling stage

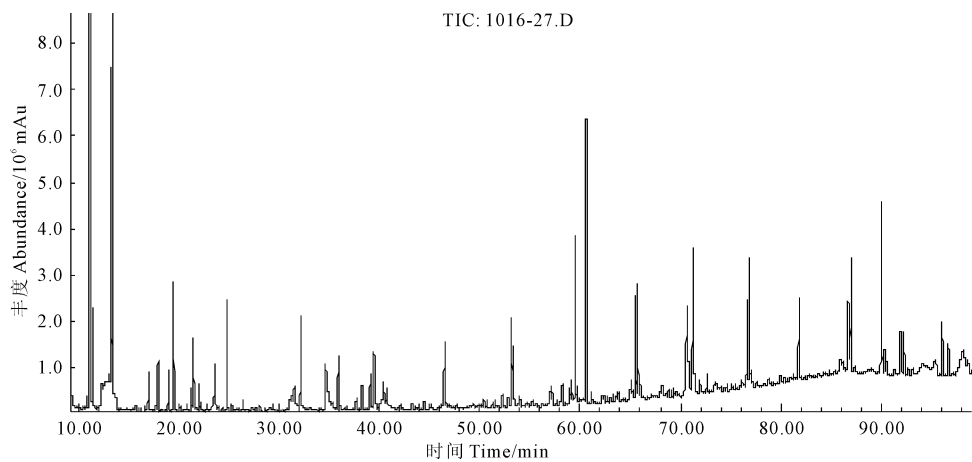


图 2 连作马铃薯出苗期根区土壤有机物 GC - MS 图谱

Fig.2 GC - MS profile of soil organic compounds of potato rhizosphere from the continuous cropping field during the seedling stage

从表 1 中看出, N, N - 二甲基甲酰胺、丙酸丙酯、2 - 辛烯醛、辛醛、壬烷、2, 6 - 二甲基壬烷、2 - 十一烯醛、1 - 十二烯、1 - 十三烷醇、1 - 十五碳烯、二丁基羟基甲苯、1, 2 - 苯二甲酸二(2 - 甲基丙基)酯、5 - 十八烯 13 种有机物, 它们是连作 3 a 土壤溶液中独有物质, 含量最高的是丙酸丙酯(22.335%), 最低的是 2 - 十一烯醛(0.258%)。此外, 还发现连作土壤中乙酸丙酯、甲苯和 1 - 十九碳烯 3 种有机物的含量均高于轮作含量 1 倍以上。此外, 与连作土壤有机化合物比对, 轮作土壤中也有 10 种化合物是其独有的物质, 表明玉米和马铃薯的根系分泌物有一定差异, 合理轮作是克服有机自毒物质积累的有效措施。

2.2 轮作和连作马铃薯落花期根区土壤有机物鉴定结果

马铃薯种植时间延长至落花期, 轮作和连作土壤溶液有机化合物测定分析数据见图 3 和图 4, 与数据库化合物匹配鉴定结果见表 2。从表 2 中可以看出, 在连作土壤中生长 80 d 后, 土壤溶液中新增或独有的有机化合物有 7 种, 即甲酰胺 - N, N - 二甲基、醛、3 - 乙基正辛烷、8 - 十七碳烯、十六烷酸丙基酯、二十烷、3, 3 - 二甲基辛烷。结合已有的研究结果发现^[13-14], 十六烷酸丙基酯也称棕榈酸丙基酯是植物自毒物质, 该物质由于特异性地出现在连作马铃薯的落花期土壤溶液中, 故其可能也是马铃薯连作障碍的自毒物质。其它物质在马铃薯中是否具有自毒性尚需进一步分析。

表 1 轮作和连作条件下出马铃薯苗期根区土壤有机物种类及相对含量比较

Table 1 Soil organic compounds and relative content from continuous cropping and rotation field during the seedling stage			
轮作 Rotation		连作 Continuous cropping	
有机物名称 Organic compounds	相对含量/% Relative content	有机物名称 Organic compounds	相对含量/% Relative content
		N,N-二甲基甲酰胺 N,N-Dimethylformamide; C ₃ H ₇ NO	0.455
1,2-乙二醇 1,2-Ethylene glycol; C ₂ H ₆ O ₂			
乙酸乙酯 Ethyl acetate; C ₄ H ₈ O ₃	0.099		
丙酸乙基酯 Ethyl propionate; C ₅ H ₁₀ O ₂	6.524	丙酸乙基酯 Ethyl propionate; C ₅ H ₁₀ O ₂	1.015
乙酸丙酯 n-Propyl acetate; C ₅ H ₁₀ O ₂	0.434	乙酸丙酯 n-Propyl acetate; C ₅ H ₁₀ O ₂	1.051
		丙酸丙酯 n-Propyl propionate; C ₆ H ₁₂ O ₂	22.335
醛 Aldehyde; C ₆ H ₁₂ O	0.437	醛 Aldehyde; C ₆ H ₁₂ O	0.556
甲苯 Methylbenzene; C ₇ H ₈	2.079	甲苯 Methylbenzene; C ₇ H ₈	8.044
庚醛 Enanthaldehyde; C ₇ H ₁₄ O	0.093		
乙苯 Ethylbenzene; C ₈ H ₁₀	0.449	乙苯 Ethylbenzene; C ₈ H ₁₀	0.665
苯乙烯 Styrene; C ₈ H ₈	0.382	苯乙烯 Styrene; C ₈ H ₈	0.537
对二甲苯 p-Xylene; C ₈ H ₁₀	1.399	对二甲苯 p-Xylene; C ₈ H ₁₀	2.067
2-乙基-1-己醇 2-Ethyl-1-hexanol; C ₈ H ₁₈ O	4.320		
2-乙基己醛 2-Ethylhexanal; C ₈ H ₁₆ O	0.056		
3,5-二甲基-3-己醇 3,5-Dimethyl-3-hexanol; C ₈ H ₁₈ O	0.519		
		2-辛烯醛(E) E-2-octenal; C ₈ H ₁₄ O	2.352
		辛醛 Octanal; C ₈ H ₁₆ O	0.351
		壬烷 n-Nonane; C ₉ H ₂₀	0.818
氯甲酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl chloroformate; C ₉ H ₁₇ ClO ₂	1.350		
1,2,3-三甲基苯 1,2,3-Trimethyl benzene; C ₉ H ₁₂	0.066		
2-壬酮 2-Nonanone; C ₉ H ₁₈ O	0.761	2-壬酮 2-Nonanone; C ₉ H ₁₈ O	0.718
1R-α-蒎烯 1R-alpha-Pinene; C ₁₀ H ₁₆	1.105	1R-α-蒎烯 1R-alpha-Pinene; C ₁₀ H ₁₆	1.507
癸烷 Decane; C ₁₀ H ₂₂	1.003	癸烷 Decane; C ₁₀ H ₂₂	1.879
乙酸-2-乙基己基酯 2-Ethyl-1-hexanol acetate; C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.587	乙酸-2-乙基己基酯 2-Ethyl-1-hexanol; C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.433
2,7,7-三甲基-3-氧杂三环[4.1.1.0(2,4)]辛烷 2,7,7-Trimethyl-3-Oxa-tricyclo[4.1.1.0(2,4)]Octane; C ₁₀ H ₁₆ O	1.036	2,7,7-三甲基-3-氧杂三环[4.1.1.0(2,4)]辛烷 2,7,7-Trimethyl-3-Oxa-tricyclo[4.1.1.0(2,4)]Octane; C ₁₀ H ₁₆ O	0.525
2-甲基壬烷 2-Methyl nonane; C ₁₀ H ₂₂	0.072		0.229
3-乙基正辛烷 3-Ethyl-octane; C ₁₀ H ₂₂	5.263	3-乙基正辛烷 3-Ethyl octane; C ₁₀ H ₂₂	5.857
十一烷 Undecane; C ₁₁ H ₂₄	1.168	十一烷 Undecane; C ₁₁ H ₂₄	1.733
1-(1-甲氧基乙氧基)正辛烷 1-(1-Methoxy ethoxy)octane; C ₁₁ H ₂₄ O ₂	0.603		
		2,6-二甲基壬烷 2,6-Dimethylnonane; C ₁₁ H ₂₄	0.229
2-甲基癸烷 2-Methyldecane; C ₁₁ H ₂₄	0.074		
		2-十一烯醛 2-Undecenal; C ₁₁ H ₂₀ O	0.258
十二烷 Dodecane; C ₁₂ H ₂₆	0.815	十二烷 Dodecane; C ₁₂ H ₂₆	1.060
		1-十二烯 1-Dodecane; C ₁₂ H ₂₄	0.262
十三烷 Tridecane; C ₁₃ H ₂₈	1.476	十三烷 Tridecane; C ₁₃ H ₂₈	1.615
		1-十三烷醇 1-trldecanol; C ₁₃ H ₂₈ O	0.298
十四烷 Tetradecane; C ₁₄ H ₃₀	1.308	十四烷 Tetradecane; C ₁₄ H ₃₀	1.682
1-十四碳烯 1-Tetradecene; C ₁₄ H ₂₈	1.062	1-十四碳烯 1-Tetradecene; C ₁₄ H ₂₈	1.104
十五烷 Pentadecane; C ₁₅ H ₃₂	2.359	十五烷 Pentadecane; C ₁₅ H ₃₂	3.172
		1-十五碳烯 1-Pentadecene; C ₁₅ H ₃₀	0.374
		二丁基羟基甲苯 (Butylated hydroxytoluene); C ₁₅ H ₂₄ O	0.481
十六烷 Hexadecane; C ₁₆ H ₃₄	1.358	十六烷 Hexadecane; C ₁₆ H ₃₄	1.905
1-十六碳烯 1-Hexadecene; C ₁₆ H ₃₂	1.688	1-十六碳烯 1-Hexadecene; C ₁₆ H ₃₂	2.120
		1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯 Methylphthalate (2-methyl-propyl); C ₁₆ H ₂₂ O ₄	3.970
十七烷 Heptadecane; C ₁₇ H ₃₆	1.961	十七烷 Heptadecane; C ₁₇ H ₃₆	2.692
8-十七碳烯 8-Heptadecene; C ₁₇ H ₃₄	1.255	8-十七碳烯 8-Heptadecene; C ₁₇ H ₃₄	1.552
十八烷 Octadecane; C ₁₈ H ₃₈	0.968	十八烷 Octadecane; C ₁₈ H ₃₈	1.453
		5-十八烯,(E) E-5-Octadecane; C ₁₈ H ₃₆	2.110
十九烷 Nonadecane; C ₁₉ H ₄₀	0.979	十九烷 Nonadecane; C ₁₉ H ₄₀	1.475
1-十九碳烯 1-Nonadecene; C ₁₉ H ₃₈	1.612	1-十九碳烯 1-Nonadecene; C ₁₉ H ₃₈	2.238

与出苗期连作土壤溶液独有物质比对分析,发现壬烷、丙酸丙酯、辛醛、二丁基羟基甲苯、1,2 - 苯二甲酸二(2 - 甲基丙基)酯 5 种化合物在落花期时均有一定含量,且轮作和连作含量基本相同,表明这些物质不是马铃薯自毒化合物。进一步分析 2,6 - 二甲基壬烷、2 - 辛烯醛、2 - 十一烯醛、1 - 十二烯、1 - 十三烷醇、1 - 十五碳烯、5 - 十八烯 7 种化合物,发现它们在落花期的连作土壤溶液中消失,表明它们也不是马铃薯连作自毒物质。落花期连作土壤中 N,N - 二甲基甲酰胺物质也是出苗期连作土壤独有物质,其浓度为 0.455% (出苗期)和 0.699% (落花

期),故该物质作用需进一步深入研究,以期确定其在连作土壤中的作用。

进一步分析出苗期和落花期土壤溶液中的其它有机物质,均发现马铃薯在轮作土壤中生长至出苗期,其有机物质种类与轮作落花期、连作出苗期、连作落花期的物质种类有很大的不同,而后三种种植模式的化合物种类和含量相对较一致。这可能是因为轮作出苗期测定的土壤有机物质既有少量的马铃薯根系分泌物,也有大量的前茬作物玉米积累的有机物,导致该期土壤有机物的组成与其它处理差异明显。

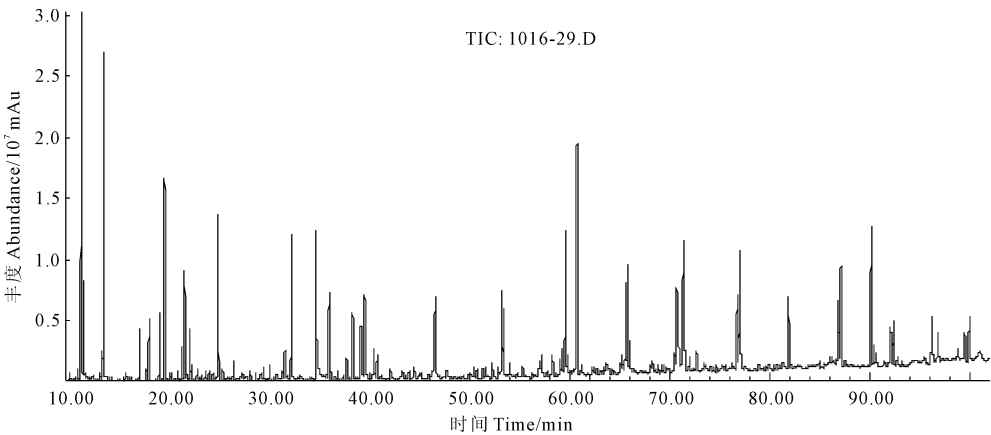


图 3 轮作马铃薯落花期根区土壤有机物 GC - MS 图谱

Fig.3 GC - MS profile of soil organic compounds of potato rhizosphere from rotation field during the falling flower stage

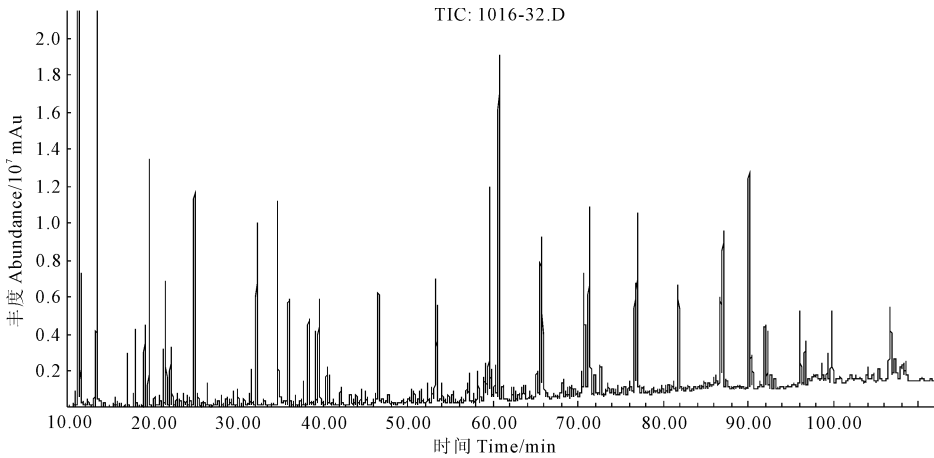


图 4 连作马铃薯落花期根区土壤有机物 GC - MS 图谱

Fig.4 GC - MS profile of soil organic compounds of potato rhizosphere from continuous cropping field during the falling flower stage

3 结论与讨论

连作障碍发生的原因之一是化感作用。已有的研究表明,化感物质具有选择性和专一性、浓度效应和复合效应等特点^[15]。在众多的根系分泌物中,低分子量有机酸、酚类和内萜类化合物最为常见^[16],其中酚酸类物质被认为是主要的化感因子^[17-19]。

王闯等^[20]发现,马铃薯根际土壤、根、地上部分浸提液均能刺激瓜列当(*Orobanche aegyptiaca*)种子萌发,且不同马铃薯品种对瓜列当的化感作用有差异。本研究对轮作和连作 3 a 的土壤溶液利用 GC - MS 方法进行了有机物质分析,对匹配度 80% 以上的 40 多种有机物进行了不同连作条件下的比对分析,发现出苗期和落花期,轮作和连作的马铃薯根际土壤

表 2 轮作和连作条件下马铃薯落花期根区土壤有机物种类及相对含量比较

轮作 Rotation		连作 Continuous cropping	
有机物名称 Organic compounds	相对含量/% Relative content	有机物名称 Organic compounds	相对含量/% Relative content
		N,N-二甲基甲酰胺 N,N-Dimethylformamide; C ₃ H ₇ NO	0.699
丙酸乙基酯 Ethyl propionate; C ₅ H ₁₀ O ₂	14.746	丙酸乙基酯 Ethyl propionateer; C ₅ H ₁₀ O ₂	14.977
乙酸丙酯 n-Propyl acetate; C ₅ H ₁₀ O ₂	0.939	乙酸丙酯 n-Propyl acetate; C ₅ H ₁₀ O ₂	0.883
		醛 Aldehyde; C ₆ H ₁₂ O	0.543
甲苯 Methylbenzene; C ₇ H ₈	5.622	甲苯 Methylbenzene; C ₇ H ₈	5.473
2-庚酮 2-Heptanone; C ₇ H ₁₄ O	0.271		
庚醛 Enanthaldehyde; C ₇ H ₁₄ O	0.164		
乙苯 Ethylbenzene; C ₈ H ₁₀	1.031	乙苯 Ethylbenzene; C ₈ H ₁₀	0.886
对二甲苯 p-Xylene; C ₈ H ₁₀	3.276	对二甲苯 p-Xylene; C ₈ H ₁₀	2.813
苯乙烯 Styrene; C ₈ H ₈	0.887	苯乙烯 Styrene; C ₈ H ₈	0.719
辛醛 Octanal; C ₈ H ₁₆ O	0.490	辛醛 Octanal; C ₈ H ₁₆ O	0.422
2-乙基-1-己醇 2-Ethyl-1-hexanol; C ₈ H ₁₈ O	4.654	2-乙基-1-己醇 2-Ethyl-1-hexanediol; C ₈ H ₁₈ O	4.182
壬烷 n-Nonane; C ₉ H ₂₀	0.981	壬烷 n-Nonane; C ₉ H ₂₀	0.865
2-壬酮 2-Nonanone; C ₉ H ₁₈ O	1.025	2-壬酮 2-Nonanone; C ₉ H ₁₈ O	0.991
1R-α-蒎烯 1R-alpha-Pinene; C ₁₀ H ₁₆	2.187	1R-α-蒎烯 1R-alpha-Pinene; C ₁₀ H ₁₆	1.785
癸烷 Decane; C ₁₀ H ₂₂	3.122	癸烷 Decane; C ₁₀ H ₂₂	2.654
7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇 7-methyl-3-methylene-6-octene-1-ol; C ₁₀ H ₁₈ O	0.261		
3-氧杂三环[4.1.1.0(2,4)]辛烷,2,7,7-三甲基 2,7,7-Trimethyl-3-Oxa-tricyclo[4.1.1.0(2,4)]Octane; C ₁₀ H ₁₆ O	1.417	3-氧杂三环[4.1.1.0(2,4)]辛烷,2,7,7-三甲基 2,7,7-Trimethyl-3-Oxa-tricyclo[4.1.1.0(2,4)]Octane; C ₁₀ H ₁₆ O	1.261
乙酸-2-乙基己基酯 2-Ethyl-1-hexanol; C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.610		
		3-乙基正辛烷 3-Ethyl octane; C ₁₀ H ₂₂	6.121
十一烷 Undecane; C ₁₁ H ₂₄	2.852	十一烷 Undecane; C ₁₁ H ₂₄	2.390
2,6-二甲基壬烷 2,6-Dimethylnonane; C ₁₁ H ₂₄	0.395		
1-(1-甲氧基乙氧基)正辛烷 1-(1-Methoxyethoxy)octane; C ₁₁ H ₂₄ O ₂	0.771		
十二烷 Dodecane; C ₁₂ H ₂₆	1.662	十二烷 Dodecane; C ₁₂ H ₂₆	1.393
3,4-二甲基-1-癸烯 3,4 dimethyl-1-decene; C ₁₂ H ₂₄	6.129		
十三烷 Tridecane; C ₁₃ H ₂₈	2.225	十三烷 Tridecane; C ₁₃ H ₂₈	1.996
十四烷 Tetradecane; C ₁₄ H ₃₀	1.984	十四烷 Tetradecane; C ₁₄ H ₃₀	1.890
1-十四碳烯 1-Tetradecene; C ₁₄ H ₂₈	1.348	1-十四碳烯 1-Tetradecene; C ₁₄ H ₂₈	1.321
十五烷 Pentadecane; C ₁₅ H ₃₂	3.330	十五烷 Pentadecane; C ₁₅ H ₃₂	3.319
二丁基羟基甲苯 Butylated hydroxytoluene; C ₁₅ H ₂₄ O	0.697	二丁基羟基甲苯 Butylated hydroxytoluene; C ₁₅ H ₂₄ O	0.722
十六烷 Hexadecane; C ₁₆ H ₃₄	0.148	十六烷 Hexadecane; C ₁₆ H ₃₄	1.941
1-十六碳烯 1-Hexadecene; C ₁₆ H ₃₂	2.080	1-十六碳烯 1-Hexadecene; C ₁₆ H ₃₂	2.160
1,1-氧代二正辛烷 1,1-Octyl oxide; C ₁₆ H ₃₄ O	0.335	1,1-氧代二正辛烷 1,1-Octyl oxide; C ₁₆ H ₃₄ O	0.348
1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯 Methylphthalate (2-methyl-propyl); C ₁₆ H ₂₂ O ₄	3.408	1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯 Methylphthalate (2-methyl-propyl); C ₁₆ H ₂₂ O ₄	3.625
十七烷 Heptadecane; C ₁₇ H ₃₆	2.513	十七烷 Heptadecane; C ₁₇ H ₃₆	2.606
E-15 Heptadecenal; C ₁₇ H ₃₂ O	1.832		
		8-十七碳烯 8-Heptadecene; C ₁₇ H ₃₄	1.674
十八烷 Octadecane; C ₁₈ H ₃₈	1.391	十八烷 Octadecane; C ₁₈ H ₃₈	1.474
十九烷 Nonadecane; C ₁₉ H ₄₀	1.414	十九烷 Nonadecane; C ₁₉ H ₄₀	1.421
1-十九碳烯 1-Nonadecene; C ₁₉ H ₃₈	2.030	1-十九碳烯 1-Nonadecene; C ₁₉ H ₃₈	2.203
		十六烷酸,丙基酯 Palmitic acid propyl ester; C ₁₉ H ₃₈ O ₂	0.827
		二十烷 Icosane; C ₂₀ H ₄₂	1.511
十八烷酸,2-丙烯基酯 Stearic acid,2-propylene ester; C ₂₁ H ₄₀ O ₂	1.608	十八烷酸,2-丙烯基酯 Stearic acid,2-propylene ester; C ₂₁ H ₄₀ O ₂	1.586
二十一烷 Heneicosane; C ₂₁ H ₄₄	1.127	二十一烷 Heneicosane; C ₂₁ H ₄₄	0.993
1-二十二碳烯 1-Docosene; C ₂₂ H ₄₄	1.692	1-二十二碳烯 1-Docosene; C ₂₂ H ₄₄	1.795
		3,3-二甲基辛烷 3,3-Dimethyloctane; C ₁₀ H ₂₂	0.329

中均能检出炔、苯、酸、醇、酯、醛、酮,酰胺及其烃衍生物。其中出苗期连作3a的土壤中,N,N-二甲基甲酰胺、丙酸丙酯、2-辛烯醛、辛醛、壬烷、2,6-二甲基壬烷、2-十一烯醛、1-十二烯、1-十三烷醇、1-十五碳烯、二丁基羟基甲苯、1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯、5-十八烯13种有机物为独有物质,且含量最高的是丙酸丙酯(22.335%),最低的是2-十一烯醛(0.258%)。连作土壤中还有3种化合物,即乙酸丙酯、甲苯和1-十九碳烯的含量均高于轮作含量1倍以上,表明马铃薯根系分泌物与玉米根系分泌物差异较大。延长连作土壤中马铃薯种植时间至80d,发现又新增或独有7种有机化合物,即甲酰胺-N,N-二甲基、醛、3-乙基正辛烷、8-十七碳烯、十六烷酸丙基酯、二十烷、3,3-二甲基辛烷。结合已有的研究结果发现,十六烷酸丙基酯也称棕榈酸是植物自毒物质^[13-14],该物质由于特异性地出现在连作马铃薯的落花期土壤溶液中,故其可能也是马铃薯连作障碍的自毒物质,但其作用尚待进一步验证。

将出苗期连作土壤溶液独有物质与落花期连作土壤有机化合物进行比对,发现部分物质[壬烷、丙酸丙酯、辛醛、二丁基羟基甲苯、1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯]的含量与落花期轮作土壤中的含量基本一致,部分物质(2,6-二甲基壬烷、2-辛烯醛、2-十一烯醛、1-十二烯、1-十三烷醇、1-十五碳烯、5-十八烯)在落花期连作土壤溶液中消失,故认为出苗期测定的连作土壤溶液中的这些物质均不是化感自毒物质。仅有N,N-二甲基甲酰胺物质是出苗期和落花期连作土壤始终存在的独有物质,其浓度为0.455%(出苗期)和0.699%(落花期),故该物质对马铃薯植株生长发育的作用尚需进一步深入研究。

本研究还发现,出苗期由于轮作土壤的有机物既有马铃薯根系分泌物,也有前茬作物玉米积累的有机物,且马铃薯根系分泌物不占优势,导致该期轮作土壤的有机物种类和含量均与轮作落花期、连作出苗期、连作落花期有很大差异,表明玉米根系分泌物与马铃薯根系分泌物间差异较大,马铃薯与玉米间的轮作是克服马铃薯连作障碍的有效措施之一。随着马铃薯植株发育进程推进,马铃薯植株产生的根系分泌物迅速增加,导致轮作落花期和连

作落花期的化合物种类和含量相对较一致。

参考文献:

- [1] 裴国平,王 蒂,张俊莲.连作马铃薯对抗性酶及生物学特性变化的研究[J].湖南农业科学,2010,(11):34-37.
- [2] 牛秀群,李金花,张俊莲.甘肃省干旱灌区连作马铃薯根际土壤中镰刀菌的变化[J].草业学报,2011,20(4):236-243.
- [3] 孟品品,刘 星,邱慧珍,等.连作马铃薯根际土壤真菌种群结构及其生物学效应[J].应用生态学报,2012,(11):3079-3086.
- [4] 章云云,朱端卫,王 晓,等.植物根系分泌物的作用及其与药用植物连作障碍的关系[J].湖北农业科学,2014,53(6):1241-1244.
- [5] 陈 希,赵 爽,史亚东,等.生物有机肥对‘滁菊’连作障碍的影响[J].南京农业大学学报,2015,38(1):50-56.
- [6] 王 飞,李世贵,徐凤花,等.连作障碍发生机制研究进展[J].中国土壤与肥料,2013,(5):6-13.
- [7] 符建国,贾志红.烤烟连作障碍产生机制及其调控研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(28):13762-13764.
- [8] 林文雄,何华勤,董章杭.不同环境下水稻对受体植物化感作用的动态遗传研究[J].作物学报,2004,30(4):348-353.
- [9] 林文雄,熊 君,周军建,等.化感植物根际生物学特性研究现状与展望[J].中国生态农业学报,2007,15(4):1-8.
- [10] Uren N C, Reisenauer H M. The role of root exudates in nutrient acquisition[C]//Tinker B, Lauchli A. Advances in Plant Nutrition Vol 3. New York: Praeger Publishers,1988:79-114.
- [11] Qasen J R, Foy C L. Weed allelopathy, its ecological impacts and future prospects:A review[J]. Journal of Crop Production,2001,4(2):43-119.
- [12] 吴龙华,骆永明.根际土壤溶液取样器——介绍一种新型原位土壤溶液采集装置[J].土壤,1999,(1):54-56,27.
- [13] 白 茹.苹果连作障碍中自毒作用的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [14] 孙跃春,林淑芳,黄璐琦,等.药用植物自毒作用及调控措施[J].中国中药杂志,2011,36(4):387-390.
- [15] 杜 茜,童 娟,卢 迪.马铃薯连作对茄科作物的化感效应[J].北方园艺,2010,(20):1-4.
- [16] 孙文浩,余叔文.相生相克效应及其应用[J].植物生理学通讯,1992,28(2):81-87.
- [17] Yu J Q, Mistsui Y. Effect of root exudates of cucumber and allelochemicals onion uptake by cucumber seedlings[J]. Chem Ecol,1997,23:817-827.
- [18] Schutter M E, Sandeno J M, Dick R P. Seasonal, soil type, alternative management influences on microbial communities of vegetable cropping systems[J]. Biology Fertility Soils, 2001,34:397-410.
- [19] Ye S F, Yu J Q, Peng Y H, et al. Incidence of Fusarium wilt in *Cucumis sativus* L. is promoted by cinnamic acid, an autotoxin in root exudates[J]. Plant and Soil, 2004,263:143-150.
- [20] 王 闯,徐公义,葛长城,等.酚酸类物质和植物连作障碍的研究进展[J].北方园艺,2009,(3):134-137.