

袁 圆, 张爱民, 王永平, 等. 连作辣椒根围化学成分鉴定与动态分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 139–144.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.034

# 连作辣椒根围化学成分鉴定与动态分析

袁 圆<sup>1</sup>, 张爱民<sup>1</sup>, 王永平<sup>1</sup>, 梁传静<sup>1</sup>, 廖芳芳<sup>1</sup>, 吴康云<sup>1</sup>, 张 明<sup>2</sup>, 邢 丹<sup>1</sup>

(1. 贵州省农业科学院辣椒研究所, 贵州贵阳 550006; 2. 中国科学院天然产物化学重点实验室, 贵州贵阳 550002)

**摘要:**为比较不同辣椒品种(系)、生育期及种植年限对辣椒根系及土壤化学成分的影响, 科学地研究辣椒连作障碍问题及化感作用, 于辣椒盛花期及盛果期采集连作地及非连作地不同辣椒品种(系)根系和土壤, 采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对其各化学组分进行鉴定及动态分析。结果表明, 辣椒盛花期及盛果期根系及根际土壤的化学成分数目、种类及相对质量分数占比总体呈动态趋势发展, 其中辣椒盛花期根系共检出 13 类 77 种物质, 土壤中共检测出 14 类 46 种物质; 盛果期根系浸提液共检测出 11 类 63 种物质, 土壤浸提液共检测出 14 类 56 种物质。其中, 当地品种绥阳小米辣连作地中的酚、酸类物质数目增长速度最快, 明显高于其非连作地和其他品种的处理, 且根系中酚酸类物质的原始积累量高于杂交品种黔椒 5 号(线椒)和辣研 2 号(朝天椒)平均数; 醇类物质是辣椒根系及土壤中检测到的所有物质中占比较高的一类组分; 烷类物质只在 7 月份盛花期的连作土壤里检测到; 酯类组分随着种植时间及生育期的推移, 在土壤里呈小范围上升; 酰胺类和酮类成分整体变化水平不高; 醛类物质随着生育期的进行在土壤中数量增多, 在根系中减少。

**关键词:**辣椒; 连作; 土壤; 根系; 化学成分

**中图分类号:**S641.301 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)21-0139-06

辣椒是贵州地区重要的经济作物之一。遵义市地处贵州省北部, 处于云贵高原向湖南丘陵和四川盆地过渡的斜坡地带, 地形起伏大, 地貌类型复杂, 海拔高度一般在 800 ~ 1 300 m, 属亚热带季风气候, 终年温凉湿润, 冬无严寒、夏无酷暑, 雨量充沛, 日照充足, 全境可以种植辣椒, 是全国闻名的辣椒主要种植区, 拥有全国最大的辣椒集散交易中心, 辣椒品质在全国名列前茅。近年来在当地政府的扶持下, 辣椒规模逐年增加, 至 2016 年种植规模为 13 万多 hm<sup>2</sup>, 占全省辣椒种植总面积的 48%, 主要种植品种有圆颗粒、小米椒、子弹头、

二荆条等<sup>[1]</sup>。

辣椒在连年栽培的过程中受连作障碍的严重威胁, 其产量及品质降低。化感物质的累积是产生辣椒连作障碍的主要因素之一, 也是辣椒集约化发展的一个瓶颈, 研究发现, 在连作栽培中辣椒根系会分泌一些化感物质, 譬如酚酸类物质, 这些酚酸物质会随着连作时间的增加在土壤中不断富集, 进而抑制辣椒植株生长。此外, 上茬作物收获后, 其残留植物体的分解也会释放部分酚酸物质, 不利于辣椒植株的生长。酚酸物质的累积可为土壤中病原微生物提供碳源, 降低土壤 pH 值, 影响植株对养分和水分的摄取, 进而导致植株抵抗力下降, 为病原菌的侵入创造有利条件, 从而引起土传病害的大暴发, 危害辣椒的产量以及品质。研究表明, 植物所释放的化感物质可归为以下几类: 水溶性有机酸类、不饱和内酯、脂肪酸和多炔、醌类物质、酚类、苯甲酸及其衍生物、肉桂酸及其衍生物、香豆素类; 类黄酮、单宁、类萜和甾类化合物、氨基酸和多肽、生物碱和氰醇、硫化物和芥子油苷、嘌呤和核苷等<sup>[2]</sup>。目前有关遵义市连作辣椒根际周围化学成分鉴定与动态变化研究的相关报道较少, 本研究通过分析不同辣椒品种、生育期及种植年限的根系及土壤化学成分, 结合已被广泛报道具有化

收稿日期: 2018-01-30

基金项目: 贵州省科技支撑计划(编号: 黔科合 NY[2015]3018-2 号); 贵州省农业科学院自主创新专项[编号: 黔农科院自主创新科研专项字(2014)012 号]; 贵州省科技平台及人才计划(编号: 黔科合平台人才[2017]5709)。

作者简介: 袁 圆(1991—), 女, 贵州习水人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为连作辣椒病害鉴定及其综合防控。E-mail: 15286011425@163.com。

通信作者: 邢 丹, 博士研究生, 副研究员, 研究方向为辣椒种植环境与安全高效生产。E-mail: 2004xingdan@163.com。

[11] Holmström K, Somersalo S, Mandal A, et al. Improved tolerance to salinity and low temperature in transgenic tobacco producing glycine betaine[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(343): 177–185.

[12] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 2000, 51(51): 463–499.

[13] 张晓倩, 王康才, 张彦南, 等. 水飞蓟萌发期和苗期对 NaCl 胁迫的生长生理响应[J]. 西北植物学报, 2013, 33(10): 2050–2056.

[14] 张晓倩, 王康才, 张彦南, 等. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下水飞蓟种

子萌发和幼苗生长生理的影响[J]. 中草药, 2013, 44(22): 3216–3222.

[15] 张 鑫, 刘广娜. NaCl 胁迫对水飞蓟有效成分影响的研究[J]. 吉林农业科技学院学报, 2013, 22(4): 1–3.

[16] 何树斌, 刘国利, 杨惠敏. 水分处理下紫花苜蓿刈割后茬的光合变化及其机制[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 192–197.

[17] 余叔文, 汤章城. 植物生理学及分子生物学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1998: 366–389.

[18] 张海燕, 赵可夫. 盐分和水胁迫对盐碱地蓬幼苗渗透调节效应研究[J]. 植物学报, 1998, 40(1): 56–61.

感作用的组分,剖析遵义市辣椒主产区辣椒根系与根际土壤主要化学成分及潜在的化感物质种类及积累情况,旨在为深入研究辣椒化感物质与自毒作用提供参考,为更好更快地解决辣椒连作障碍提供基础理论数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 试验材料 选择黔椒 5 号(线椒)、辣研 2 号(朝天椒)、绥阳小米辣(本地品种)3 个品种作为供试材料,其中黔椒 5 号和辣研 2 号分别为贵州省农业科学院园艺研究所和贵州省农业科学院蚕业辣椒研究所选育的杂交品种,绥阳小米辣为当地自留种。

1.1.2 供试仪器 HP6890/5975C 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)(美国安捷伦科技公司)、EYELA N-1100 旋转蒸发仪(东京理化器械株式会社)、SHB-III 循环水式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司)、KQ300DE 型数控超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司)等。

### 1.2 方法

1.2.1 田间小区设计 将 3 个辣椒品种[黔椒 5 号(线椒)、辣研 2 号(朝天椒)、绥阳小米辣(本地品种)]分别种植在面积为 667 m<sup>2</sup> 的连作地(连续种植辣椒 10 年)和非连作地(第 1 年种植辣椒)里,其中每块地均分为 3 个小区,每个小区按随机机组对 3 个辣椒品种进行排列种植,每个品种种植 60 株,生长期采用相同的栽培措施及管理模式。

1.2.2 样品采集 于 2016 年 7—8 月(辣椒盛花期和盛果期)采集遵义市永乐镇辣椒连作地及非连作地辣椒根系及根际土壤,按照五点取样法,分别选择黔椒 5 号(线椒)、辣研 2 号(朝天椒)、绥阳小米辣(本地品种)3 个品种进行采样,并带回实验室进行 GC-MS 化学成分鉴定与分析。

1.2.3 样品前处理 将土样和根系样品放置在阴凉通风处自然风干,然后将土样研磨后过 40 目筛备用,根系样品粉碎后备用。分别称取 4 g 土壤样品和 1 g 根部样品,加入 20 mL 提取液(甲醇:乙酸乙酯=1:1)浸提,于超声清洗机超声 2 次(每次 30 min)后放置过夜。将浸提液于 3 000 r/min 转速下离心 5 min,将样品溶剂部分于 35 ℃减压浓缩,土壤样品加 200 μL 甲醇溶解,根系样品加 2 mL 甲醇溶解,于 -20 ℃冰箱中保存。

1.2.4 样品检测 采用气相色谱-质谱联用仪鉴定样品化学成分,进样量为 2 μL。

检测条件:色谱柱为 AB-INOWAX(30 m×0.25 μm×0.25 mm)毛细管柱。程序升温:初始温度 40 ℃(保持 2 min),以 5 ℃/min 升温至 240 ℃后,保持 16 min。运行时间:58 min,汽化室温度为 250 ℃,载气为高纯 He(99.999%),柱前压为 7.65 psi,载气流量为 1.0 mL/min,不分流。溶剂延迟时间:5.0 min。

质谱条件:离子源为电子轰击离子源(EI),离子源温度为 230 ℃,四级杆温度为 150 ℃,电子能量为 70 eV,发射电流为 34.6 μA,倍增器电压为 1 812 V,接口温度为 280 ℃,质量范围为 29~500 amu。

化学成分鉴定:对总离子流图中的各峰经质谱计算机数据库检索及核对 Nist2005 和 Wiley275 标准质谱图,检索出

相应的物质,确定化学成分,并通过峰面积归一化法测定各化学成分的相对质量分数,从而得到不同物质及组分在根际及土壤中的百分数。

### 1.3 数据处理

通过 Excel 2007 进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 辣椒根际土壤化学成分鉴定与分析

由表 1 可知,7 月辣椒盛花期根际土壤浸提液共检测出 14 类 46 种物质,其中烷类 2 种、酯类 6 种、酸类 1 种、酚类 1 种、醇类 16 种、酮类 4 种、醛类 7 种、酰胺类 3 种、其他类 6 种。所检测出物质的相对质量分数在不同处理中存在一定的差异,其中绥阳小米辣连作地土壤中的醇类物质相对质量分数总和高达 54.85%,明显高于其非连作地及黔椒 5 号、辣研 2 号 2 个品种连作地和非连作地土壤中的含量;在同一辣椒品种中,醛类物质总的相对质量分数整体呈现出非连作地比连作地高的趋势,其中香草醛是已被报道的化感物质<sup>[3-5]</sup>,在连作条件下检测出绥阳小米辣根际土壤所占的相对质量分数为 0.67%,在非连作地没有被检出;酸类物质中棕榈酸在绥阳小米辣非连作地的相对质量分数为 9.76%,在其余 5 个处理中没有被检出。棕榈酸甲酯<sup>[6-12]</sup>、γ-丁内酯<sup>[13]</sup>、苯甲醛<sup>[14-15]</sup>、苯并噻唑<sup>[16-17]</sup>已在烟草等作物上报道具有化感作用,本研究在辣椒土壤也有检出,但是含量较少。

由表 2 可知,8 月辣椒盛果期土壤浸提液共检测出 14 类 56 种物质,比 7 月盛花期多 10 种物质,其中酸类物质检测出有 9 种,比 7 月多 8 种;醛类检测出 9 种,比 7 月盛花期增加 2 种物质,并检出酯类 7 种、酚类 1 种、醇类 16 种、酮类 4 种、酰胺类 3 种、其他类 7 种,可以看出,醇类、醛类、酸类数量较多,酮类、酯类次之。在绥阳小米辣连作地中,酸类物质的总相对质量分数为 45.78%,十七(烷)酸、十八(烷)酸/硬脂酸、肉豆蔻酸、油酸/十八烯酸、亚油酸、棕榈酸<sup>[6-12]</sup>等物质都被证实具有化感作用,其中棕榈酸相对质量分数最高,为 28.43%;相比连作地,绥阳小米辣非连作地均未检出相应物质。杂交品种黔椒 5 号(线椒)在连作地及非连作地土壤中未检测出酸类物质,杂交品种辣研 2 号(朝天椒)仅在非连作地土壤里检测出棕榈酸。醛类物质相比 7 月共同含有的物质有对羟基苯甲醛、二甲基缩醛、4-甲基苯甲醛、苯甲醛、糠醛。由表 2 可知,辣椒盛果期没有烷类物质被检出,醛类物质在绥阳小米辣中,非连作地的总相对质量分数明显比连作地高,在黔椒 5 号、辣研 2 号中却是相反。

### 2.2 辣椒根系化学成分鉴定与分析

由表 3 可知,盛花期根系浸提液共检测出 13 类 77 种物质,其中酸类 21 种、酯类 9 种、酚类 5 种、醇类 16 种、酮类 7 种、醛类 8 种、酰胺类 4 种、其他类 6 种,酸类物质数量占到总检测数目的 27.27%,醇类次之,占 20.78%,酚、酸类共占 33.77%。根系浸出液中总相对质量分数最高的为酸类,绥阳小米辣、黔椒 5 号、辣研 2 号非连作地和连作地中的占比分别为 71.58% 和 76.93%、63.12% 和 80.08%、78.96% 和 68.38%,可以看出,连作地含量高于非连作地的品种有绥阳小米辣和黔椒 5 号。3 个辣椒品种中酯类物质相对质量分数整体呈现出连作地比非连作地高的规律。酚类物质中 3 个辣

表 1 辣椒盛花期根际土壤化学成分分析

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣椒 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
十四烷	—	—	—	0.84	—	0.22
十六烷	—	—	—	2.31	—	—
棕榈酸甲酯	2.06	—	2.06	—	—	—
硬脂酸甲酯	6.07	0.57	6.40	3.206	2.53	4.47
γ-丁内酯	—	0.37	—	—	—	—
丁基丁酸酯	—	—	—	—	0.39	—
γ-十一内酯	—	0.41	—	—	—	—
2-甲基乳酸甲酯	—	—	—	—	0.07	—
棕榈酸	9.76	—	—	—	—	—
苯酚	0.04	0.49	—	0.44	1.69	0.17
戊醇	—	—	0.29	—	—	—
正己醇	—	0.21	1.05	—	0.15	—
正庚醇	—	0.09	—	—	0.36	—
正辛醇	—	0.28	0.52	—	0.95	—
壬醇	—	—	—	—	1.33	—
2,3-二甲基-2-己醇	—	—	—	—	0.22	—
十五醇	—	—	—	—	—	1.44
正十八醇	—	—	—	1.97	0.96	1.31
苯甲醇	2.15	6.82	2.86	3.36	4.17	1.75
3-甲基-3-丁烯-1-醇	0.14	—	—	—	0.21	—
2-丁氧基乙醇	17.20	33.77	29.60	12.30	22.93	25.04
2,5-二甲基-2,5-己二醇	3.31	9.42	—	0.54	2.28	1.77
2-乙基己醇	—	0.50	0.73	—	1.02	—
α-松油醇	—	1.95	—	—	1.33	—
对甲基二苯甲醇	0.46	1.25	—	0.21	—	—
α-枯基醇	—	0.56	—	—	—	—
环己酮	—	—	0.89	—	—	—
2,5-己二酮	—	0.56	—	—	—	—
六氢呋喃甲基丙酮	3.39	—	3.41	3.50	1.66	2.40
苯甲酮	3.88	0.95	8.60	0.39	1.26	12.50
苯甲醛	—	—	0.27	—	0.18	—
二甲基缩醛	2.70	1.04	—	—	0.42	1.14
4-甲基苯甲醛	2.33	4.10	3.31	0.42	3.78	0.83
对羟基苯甲醛	2.70	2.47	—	1.05	0.46	—
香草醛	—	0.67	—	—	—	—
糠醛	—	—	—	—	0.14	—
α-己基肉桂醛	—	—	—	1.38	—	1.91
硬脂酸酰胺	0.89	—	1.87	1.48	1.72	1.69
油酸酰胺	15.56	2.83	5.62	10.27	22.01	9.47
棕榈酸酰胺	—	—	4.15	5.94	6.81	5.48
2,7-二甲基萘	—	—	—	—	0.59	—
甲基乙基马来酰亚胺	0.71	1.16	—	0.62	0.97	—
4-甲基-2-苯并噻唑胺	—	—	—	—	—	—
二苯硫醚	—	—	—	1.22	0.43	0.66
4-甲基联苯	—	—	—	0.87	0.33	1.09
苯并噻唑	—	—	—	—	0.26	—

注:“—”表示未检测出。下表同。

椒品种非连作地、连作地共有的物质为 4-乙烯基-2-甲氧基苯酚。醛类物质中连作地比非连作地相对质量分数高的品种为绥阳小米辣和黔椒 5 号,香草醛除了在绥阳小米辣非连作地未被检出,在其余 5 个处理中均检出,且连作地含量明显

表 2 辣椒盛果期根际土壤化学成分分析

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣椒 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
2-甲基乳酸甲酯	0.05	—	—	0.04	—	—
丁基丁酸酯	0.04	—	0.18	0.18	—	—
硬脂酸甲酯	2.10	1.26	3.71	2.56	4.16	2.26
1,2-乙二醇单乙酸酯	—	1.33	—	—	—	—
棕榈酸甲酯	—	1.70	2.81	—	0.80	0.23
γ-丁内酯	—	—	—	—	0.83	0.52
γ-癸内酯	—	—	0.14	—	—	—
乙酸	—	0.76	—	—	—	—
十二碳酸	—	0.82	—	—	—	—
十五烷酸	—	1.49	—	—	—	—
十七(烷)酸	—	0.71	—	—	—	—
十八(烷)酸/硬脂酸	—	9.43	—	—	—	—
肉豆蔻酸	—	1.51	—	—	—	—
棕榈酸	—	28.43	—	—	1.98	—
油酸/十八烯酸	—	2.24	—	—	—	—
亚油酸	—	0.39	—	—	—	—
苯酚	1.09	0.11	11.56	1.17	—	1.05
戊醇	0.10	—	0.07	—	—	0.31
正己醇	0.27	0.18	0.22	0.17	0.17	0.57
庚醇	0.37	—	0.21	—	0.814	—
正辛醇	0.08	0.20	0.86	0.30	—	0.95
2-乙基己醇	0.66	8.34	0.35	0.57	0.12	1.20
二丙酮醇	0.29	—	—	—	—	—
2-丁氧基乙醇	24.31	4.98	25.65	18.99	10.24	20.22
壬醇	0.39	0.48	1.52	—	—	0.98
正十八醇	0.47	—	0.42	1.26	3.04	—
苯甲醇	15.09	0.93	4.74	3.65	4.39	12.60
对甲基二苯甲醇	0.41	—	—	0.78	0.44	0.79
2,5-二甲基-2,5-己二醇	2.08	—	3.08	2.71	1.52	2.28
α-萜品醇	—	—	1.40	—	—	—
3-甲基-3-丁烯-1-醇	—	—	—	0.20	0.39	0.10
α-枯基醇	—	—	0.30	—	—	0.19
2,3-二甲基-2-己醇	—	—	—	0.28	—	0.17
(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	0.09	—	—	—	—	0.11
六氢呋喃甲基丙酮	1.00	1.13	—	1.01	2.22	0.65
苯甲酮	0.33	0.44	5.36	0.94	0.71	0.28
环己酮	—	0.14	—	—	0.24	0.20
壬醛	—	—	—	—	0.44	—
对羟基苯甲醛	0.53	—	0.61	0.27	1.49	—
二甲基缩醛	—	—	3.09	4.60	—	2.72
4-甲基苯甲醛	4.05	—	3.49	5.70	2.12	10.92
苯甲醛	0.36	0.09	0.14	0.16	0.88	1.43
5-甲基-2-糠醛	0.40	—	—	—	0.24	—
糠醛	0.26	—	0.08	0.11	0.31	0.39
二甲基缩醛	—	—	—	—	0.26	0.25
羟基香茅醛	—	—	—	—	1.21	—
棕榈酸酰胺	12.99	1.00	4.28	6.57	8.84	6.90
硬脂酸酰胺	1.24	1.19	0.52	0.90	1.98	0.23
油酸酰胺	9.19	5.17	6.49	19.62	21.69	5.61
2,2,5,5-四甲基四氢呋喃	5.16	—	—	—	—	—
甲基吡嗪	0.11	—	—	—	—	—

续表 2

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣研 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
苯并噻唑	0.25	—	0.15	—	—	0.10
2,7-二甲基萘	—	—	0.54	0.32	—	—
二苯硫醚	—	—	—	0.62	—	0.48
4-甲基联苯	—	—	—	—	—	0.28
甲基乙基马来酰亚胺	0.53	—	0.58	—	0.64	0.62

表 3 辣椒盛花期根系化学成分分析

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣研 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
甲酸乙酸芳樟酯	0.03	—	—	—	—	—
丁内酯	0.34	0.03	0.16	—	—	—
水杨酸甲酯	0.05	—	—	0.09	—	—
苯甲酸甲酯	—	0.17	—	—	—	—
棕榈酸甲酯	—	1.12	—	0.69	0.49	1.08
硬脂酸甲酯	—	0.81	0.73	0.62	0.45	0.71
α-甘油单乙酸酯	—	—	0.10	0.86	0.36	0.39
亚油酸甲酯	—	—	0.41	—	—	—
吡喃甲酸甲酯	—	—	—	0.03	—	—
乙酸	2.41	11.28	2.00	4.71	3.98	1.50
丙酸	0.02	—	—	—	—	—
丁酸	0.02	—	—	—	—	—
己酸	0.56	0.44	—	—	0.38	0.71
庚酸	0.28	0.20	—	0.18	—	0.19
辛酸	0.25	0.35	—	0.61	—	0.32
壬酸	1.06	0.38	0.14	0.36	0.33	0.31
苯甲酸	0.12	—	0.11	0.18	0.36	0.18
月桂酸	0.28	—	—	—	—	—
苯乙酸	0.58	—	—	—	0.33	—
烟酸	0.39	0.12	—	0.37	—	—
十四烷酸	0.36	1.22	—	1.33	0.76	0.78
十五烷酸	1.03	0.65	0.42	0.39	0.69	0.66
棕榈酸	32.78	30.22	31.79	32.84	37.35	34.88
十七烷酸	1.31	1.61	6.56	1.32	1.55	0.93
硬脂酸	8.35	14.08	—	15.97	13.08	15.53
油酸	8.03	6.51	5.31	9.50	3.40	3.88
亚油酸	13.07	8.48	8.29	10.61	15.00	7.46
花生酸	0.68	1.20	8.29	1.00	1.57	0.88
4-甲基苯甲酸	—	0.19	0.21	0.47	0.18	0.12
香草酸	—	—	—	0.24	—	0.05
苯酚	0.18	—	0.44	0.08	—	0.09
4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	0.36	0.13	0.25	0.16	0.09	0.08
4-乙烯基-苯酚	—	0.05	0.33	0.13	0.10	—
二甲氧基苯酚/丁香酚	—	—	0.06	—	—	—
愈创木酚	—	—	0.31	—	—	—
正己醇	0.01	—	—	—	—	—
2-丁氧基乙醇	1.01	0.77	0.28	—	0.61	0.17
2-乙基己醇	0.13	0.15	—	—	—	—
2,3-丁二醇	0.02	—	—	—	—	—
芳樟醇	0.01	—	—	—	—	—

续表 3

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣研 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
(S)-(+) -1,2-丙二醇	0.03	—	—	—	—	—
1,2-乙二醇	0.12	—	—	0.27	0.28	0.20
糠醇	0.27	0.05	0.08	0.02	—	0.15
苯甲醇	0.24	0.05	0.03	0.15	0.13	—
苯乙醇	0.71	0.15	0.31	0.27	0.60	0.17
丙三醇	2.77	2.37	5.93	3.99	4.43	1.88
1,2-丁二醇	—	0.07	—	—	—	—
2,5-二甲基-2,5-己二醇	—	0.08	—	0.02	—	0.14
托品醇	—	2.09	—	—	—	—
丙酮醇	—	—	0.34	—	—	—
1-甲氧基-2-丙醇	—	—	—	0.03	—	0.02
环己酮	0.02	0.04	—	—	—	—
羟丙酮	0.01	—	—	—	—	—
1-甲基-2-吡咯烷酮	0.80	0.48	0.87	0.64	0.92	—
2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	1.19	0.18	1.63	0.39	0.71	0.07
萜荖酮	—	0.41	0.37	0.42	—	0.08
2-丁醇酮	—	—	—	0.12	—	—
2-吡咯烷酮	—	—	—	—	0.59	—
糠醛	0.42	—	—	—	—	—
苯甲醛	0.02	0.03	—	—	—	—
5-羟甲基-2-糠醛	0.32	—	—	0.09	0.09	—
苯乙醛	0.09	—	—	—	—	—
4-甲基苯甲醛	0.05	0.02	—	—	0.17	0.04
香草醛	—	1.13	0.29	0.73	0.36	0.93
反式-2-庚醛	—	—	—	—	0.17	—
5-甲基糠醛	—	—	—	—	0.27	—
乙酰胺	0.01	—	—	—	—	—
硬脂酸酰胺	0.20	—	—	—	0.25	—
油酸酰胺	2.23	—	—	0.25	0.86	0.46
苯乙酰胺	—	—	—	—	—	0.30
托品碱	0.22	—	17.35	0.73	—	—
古豆碱	—	0.11	—	0.13	—	—
1-甲基吡咯	0.49	0.09	0.46	0.28	—	0.08
戊基呋喃	0.02	—	—	—	—	—
二氢吡喃	—	—	0.04	—	—	—
甲基吡嗪	—	—	0.01	—	—	—
1,4:3,6-二脱水 α-D-吡喃葡萄糖	—	—	0.39	0.05	—	—

比非连作地占比高。

由表 4 可知,盛果期根系浸提液共检测出 11 类共 63 种物质,其中酯类 8 种、酸类 20 种、酚类 5 种、醇类 11 种、酮类 6 种、醛类 6 种、酰胺类 2 种、其他类 5 种,总体比 7 月盛花期数量相对减少,但同样以酸类最多,占 31.75%,醇类次之,占 17.46%。棕榈酸、亚油酸、油酸、硬脂酸在几个品种中的相对质量分数较高。在黔椒 5 号、辣研 2 号、绥阳小米辣非连作及连作地根系中,酚类、酯类总相对质量分数连作地比非连作地高。酸类组分在绥阳小米辣和黔椒 5 号根系中呈连作地高于非连作地趋势。酰胺类物质只有硬脂酸酰胺和油酸酰胺 2

表 4 辣椒盛果期根系化学成分分析

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣研 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
水杨酸甲酯	0.47	—	—	—	—	—
棕榈酸甲酯	0.22	2.16	0.56	0.46	0.95	0.67
琥珀酸单甲酯	0.34	—	—	—	—	0.05
硬脂酸甲酯	0.07	1.42	0.41	0.95	0.67	1.28
α-甘油单乙酸酯	—	0.93	0.65	0.57	0.63	0.45
油酸甲酯	—	1.20	—	0.40	—	—
乳酸甲酯	—	—	—	0.05	—	—
丙酮酸甲酯	—	—	—	—	—	0.03
乙酸	2.41	17.75	1.53	10.97	1.32	9.58
己酸	0.30	—	0.09	—	0.14	—
庚酸	0.29	0.14	—	—	0.21	0.08
辛酸	0.70	0.24	—	0.27	—	0.72
壬酸	0.30	0.20	0.15	0.15	0.43	0.68
苯甲酸	0.24	0.15	0.13	0.12	0.24	0.16
4-甲基苯甲酸	0.18	—	0.21	0.14	0.38	0.20
苯乙酸	0.13	—	—	—	—	—
十四烷酸	1.24	0.65	0.55	1.00	1.27	0.94
烟酸	—	—	0.17	—	—	—
十五烷酸	0.41	0.15	0.34	0.35	0.60	0.45
棕榈酸	37.70	19.73	33.93	19.48	33.33	—
十六烷酸	—	—	—	—	—	24.59
十七烷酸	1.47	0.61	1.25	0.92	1.78	1.26
硬脂酸	—	9.16	—	11.29	15.82	13.42
油酸	2.30	12.23	8.99	23.74	2.37	3.70
亚油酸	16.89	5.86	11.72	6.27	17.62	9.47
十九酸	—	—	—	—	0.25	—
香草酸	—	—	—	—	0.35	—
花生酸	1.74	0.73	1.06	1.14	1.75	1.65
愈创木酚	—	0.40	—	—	—	0.51
苯酚	—	0.13	0.08	0.11	0.17	0.38
4-乙基-2-甲氧基-苯酚	0.06	0.12	0.14	0.16	0.12	0.24
2,6-二甲氧基苯酚	—	—	—	0.12	—	0.19
4-乙基苯酚	0.08	0.10	0.15	0.11	0.18	0.10
1-甲氧基-2-丙酮	—	—	—	0.09	0.02	0.10
2-丁氧基乙醇	0.50	0.18	0.09	0.29	0.27	0.44
2-乙基己醇	0.07	—	—	—	—	—
2,3-丁二醇	0.58	—	—	—	—	—
1,2-乙二醇	0.30	0.09	0.11	0.26	0.33	0.23
糠醇	0.06	—	—	—	0.05	—
2,5-二甲基-2,5-己二醇	—	0.09	—	0.08	—	3.43
苯甲醇	0.18	0.09	0.17	0.04	0.31	0.17
苯乙醇	0.81	0.15	0.81	0.19	1.51	0.77
丙三醇	4.01	1.40	3.10	2.77	3.51	2.93
叶绿醇	0.41	—	—	—	—	—
1-甲基-2-吡咯烷酮	0.69	0.41	0.57	—	0.92	0.59
环己酮	—	—	—	0.01	—	—
莨菪酮	—	0.38	0.44	0.35	—	0.96
2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	0.45	0.69	0.94	0.02	0.47	—
香草乙酮	—	0.05	—	—	—	—

续表 4

化学成分	相对质量分数(%)					
	绥阳小米辣		黔椒 5 号		辣研 2 号	
	非连作地	连作地	非连作地	连作地	非连作地	连作地
1-[4-(1-甲基-2-吡咯烷基)-1-甲基-2-吡咯烷基]-2-丙酮	—	—	—	0.19	—	0.32
(E)-2-庚烯醛	0.34	—	—	—	—	—
糠醛	0.51	—	—	—	1.89	—
苯甲醛	0.03	—	—	—	—	—
5-甲基-2-糠醛	—	—	—	—	0.05	—
4-甲基苯甲醛	—	—	—	0.03	0.03	0.24
香草醛	0.98	—	0.80	0.48	0.50	0.67
硬脂酸酰胺	—	—	0.09	0.06	0.09	0.10
油酸酰胺	—	0.20	0.18	0.43	1.54	0.92
古豆碱	—	0.19	0.79	0.24	—	—
托品碱	—	4.60	12.51	8.18	—	5.03
1-甲基吡咯	0.04	0.15	0.79	0.04	0.13	0.27
二氢吡喃	0.08	—	—	—	—	—
1,4:3,6-二脱水 α-D-吡喃葡萄糖	—	0.11	—	0.19	—	0.05

种,且占比不是很高。水杨酸甲酯<sup>[18-20]</sup>、棕榈酸甲酯<sup>[6,14,21-22]</sup>、硬脂酸甲酯<sup>[6]</sup>、苯甲酸<sup>[14-15]</sup>、十四烷酸、十五烷酸、十六烷酸、十七烷酸<sup>[6]</sup>、硬脂酸<sup>[23-27]</sup>、香草酸<sup>[6]</sup>、花生酸<sup>[27]</sup>、苯甲醇<sup>[14]</sup>、叶绿醇<sup>[15,22]</sup>、苯甲醛<sup>[28]</sup>、香草醛<sup>[4-5,15]</sup>已在烟草等作物上被报道具有化感作用,它们在本研究中也检出,但是被检相对质量分数较小。

3 结论与讨论

从本研究可以看出,辣椒盛花期及盛果期根系及根际土壤的化学成分数目、种类及相对质量分数总体呈动态变化趋势,如醇类物质是辣椒根系及土壤中检测到的所有物质中占比较高的一类组分,不同时期均检测出 10 种以上物质;烷类物质只在 7 月的连作土壤里检出;酯类组分数目随着生育期的推移,在土壤中呈小范围上升趋势;酮类成分在盛花期和盛果期的根际土壤中都被鉴定出 4 种有效组分,比辣椒根系的含量少 2~3 种;醛类物质随着生育期的推后,在土壤中数量增多,在根系中减少。植株根系通过与土壤进行物质交换,通过乙酸途径合成化感物质,根部酸性增加,土壤微生物在根部积累,自毒物质降低了植株生长能力和抵抗力,与多年累积的病原菌共同作用,形成严重的土传病害,是连作障碍产生的重要原因<sup>[29]</sup>,关于其物质交换代谢机制及途径有待深入研究。

不同辣椒品种、生育期及种植年限对辣椒根系及土壤化学成分的影响不同,主要是由于在辣椒生长阶段根系会向土壤中分泌大量的根系分泌物,而有机酸是分泌物的主要成分,长期连作后,根系分泌物会在土壤中不断积累<sup>[30]</sup>。如本研究中酚、酸类物质在 7 月即辣椒盛花期时,根系里共检测出 26 种物质(其中许多物质是已被证实为具有化感作用的物质),土壤中检出 2 种;但通过 1 个生育期的积累即到辣椒盛果期时,根际土壤中酚、酸类物质的数目迅速提高到 10 种,根系的数目仅比之前减少 1 种,这种积累趋势与诸多文献报道一致。并且研究发现,当地品种绥阳小米辣连作地根际土壤中的酚、

酸类物质数目增长速度最快,从最初的 1 种物质增长到 10 种,其酸类组分相对质量分数提高 45.78 百分点,明显高于其非连作地和其他品种的处理,且根系中酚、酸类物质的初始相对质量分数比杂交品种黔椒 5 号(线椒)和辣研 2 号(朝天椒)平均数要高。相比之下,黔椒 5 号和辣研 2 号虽然在根系检测出的酚、酸类物质也比较多,但在其连作地及非连作地土壤里的检出量少且相对质量分数低。本研究可能从另外一个方向说明了生产中杂交种比本地自留种植优势强的一个原因,另外也验证了根系分泌物和土壤化学成分随着连作年限增加的变化规律,如马云华等就黄瓜连作的研究表明,随着连作年限的增加,土壤中酚酸类物质明显积累<sup>[31]</sup>。本研究未能在土壤中检测到与须文报道的主要化感物质为烷类、酯类等相似的化学成分,可能与连作时间长短、品种有关或者存在地区差异<sup>[32]</sup>。

现已有大量研究证实酚酸类物质的积累会加剧作物土传病害发生等连作障碍,如随酚酸类物质处理浓度的升高,土壤尖孢镰刀菌和甜瓜疫霉菌数量呈持续上升趋势,导致黄瓜枯萎病发生<sup>[31]</sup>。茄子根系分泌物中自毒物质香草醛和肉桂酸助长了茄子黄萎病的发生<sup>[33]</sup>。苯甲酸和肉桂酸处理可显著提高西瓜幼苗枯萎病的发病率,随着苯甲酸和肉桂酸处理浓度的提高,西瓜枯萎病病情指数和死苗率逐渐上升<sup>[34]</sup>。近年来,随着辣椒经济价值的日益增长,辣椒产业规模化发展,贵州地区因地理条件有限,辣椒连作已呈现不可阻挡的趋势,然而连作障碍对作物品质及产量造成了不可估量的损害。本研究大致明确了当地品种绥阳小米辣以及杂交品种黔椒 5 号、辣研 2 号盛花期及盛果期植株根系及根际土壤化学成分,结合现有文献报道的化感物质种类,解析了连作与非连作过程中酚酸类化感物质的积累规律,可对指导地方农业生产提供一定的理论支撑,对科学解决辣椒连作障碍有长远意义,但是化感物质与品种的关系、不同活动时期变化规律、与微生物的关系、与环境的关系还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 史琼,毛东,林洪波,等. 贵州省遵义市辣椒产业发展研究[J]. 农村经济与科技,2017,28(8):152-153.
- [2] 周倩. 连作对线辣椒硝质元素吸收的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [3] 张凤丽,周宝利. 肉桂酸和香草醛对嫁接茄子生理指标的影响研究[J]. 北方园艺,2010(4):5-7.
- [4] 汪思龙,陈龙池,廖利平,等. 几种化感物质对杉木幼苗生长的影响[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(6):588-591.
- [5] 马越强,廖利平,杨跃军,等. 香草醛对杉木幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报,1998,9(2):128-132.
- [6] 雷锋杰,张爱华,张秋菊,等. 人参、西洋参化感作用研究进展[J]. 中国中药杂志,2010,35(17):2221-2226.
- [7] 刘成. 芦苇化感作用及其化感物质分离与鉴定[D]. 重庆:西南大学,2014.
- [8] 耿广东,张素勤,程智慧. 不同化感物质对番茄根系吸收矿质元素的影响[J]. 中国蔬菜,2009(4):48-51.
- [9] 于会泳,申国明,高欣欣. 烟草根系分泌物的 GC-MS 检测[J]. 中国烟草学报,2013,19(4):64-72.
- [10] 陈磊,云兴福. 西芹鲜根及根际区物化感物质成分鉴定[J]. 华北农学报,2012,27(2):157-164.
- [11] 杨菲,黄乾明,杨春华,等. 扁穗牛鞭草水浸液化感作用及化学成分分析[J]. 四川农业大学学报,2008,26(3):232-236.
- [12] 郑阳霞,唐海东,李焕秀,等. 嫁接西瓜根系分泌物的化感效应及其化感物质的鉴定[J]. 果树学报,2011,28(5):863-868.
- [13] 李朝娣,乙引,全文选,等. 野生高山杜鹃群落林内自然挥发的化感成分[J]. 林业科学,2015,51(12):35-44.
- [14] 杨菲. 扁穗牛鞭草化感作用及其化学成分分析[D]. 雅安:四川农业大学,2008.
- [15] 柴强,黄高宝,黄鹏,等. 鹰咀豆根系分泌物的分离鉴定及典型分泌物苯甲醛的化感效应[J]. 草业学报,2005,14(1):106-111.
- [16] 鲜啟鸣. 沉水植物对铜绿微囊藻的化感作用及化感物质的分析[D]. 南京:南京大学,2005.
- [17] 申太荣. 大葱根系分泌物中两种化感物质对黄瓜幼苗及其根际微生物的化感作用[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
- [18] 周志红,骆世明,牟子平. 番茄植株中几种化学成分的化感效应[J]. 华南农业大学学报,1998,19(3):56-60.
- [19] 王哈光. 巨桉化感物质的成分分析及其化感作用的初步研究[J]. 雅安:四川农业大学,2006.
- [20] 毕海红,曾任森,骆世明,等. 茉莉酸甲酯与水杨酸甲酯对水稻化感活性的影响[C]//第 12 届全国农业生态学研讨会论文集,2006.
- [21] 邓思娟,李春远,陈实,等. 青蒿化感物质的分离与结构鉴定[J]. 华南农业大学学报,2008,29(3):42-46.
- [22] 曹光球,林思祖,王爱萍,等. 马尾松根化感物质的生物活性评价与物质鉴定[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(6):686-689.
- [23] 赵金涛. 狐尾藻化感物质的提取工艺优化及其急性毒性研究[D]. 上海:上海海洋大学,2015.
- [24] 刘苹,赵海军,唐朝辉,等. 连作对不同抗性花生品种根系分泌物和土壤中化感物质含量的影响[J]. 中国油料作物学报,2015,37(4):467-474.
- [25] 王小兵,骆永明,刘五星,等. 花生根分泌物的鉴定及其化感作用[J]. 生态学杂志,2011,30(12):2803-2808.
- [26] 由立新. 稗草根分泌物化感物质的分离鉴定及其功能[D]. 沈阳:中国科学院沈阳应用生态研究所,2009.
- [27] 赵红梅. 黄花蒿(*Artemisia annua* L.)化感物质的释放途径及其主要化感物质的分离鉴定[D]. 兰州:甘肃农业大学,2008.
- [28] 陈业兵. 银胶菊化感潜力及其潜在化感物质的分离鉴定[D]. 泰安:山东农业大学,2010.
- [29] 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(1):143-150.
- [30] 袁云云,咸洪泉,洪永聪,等. 花生根系分泌物的鉴定及其化感效应分析[J]. 花生学报,2011,40(3):24-29.
- [31] 马云华,王秀峰,魏珉,等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2149-2153.
- [32] 须文. 辣椒化感作用与连作障碍关系的研究[D]. 贵阳:贵州大学,2009.
- [33] 王茹华,周宝利,张启发,等. 茄子根系分泌物中香草醛和肉桂酸对黄萎菌的化感效应[J]. 生态学报,2006,26(9):3152-3155.
- [34] 王倩,李晓林. 苯甲酸和肉桂酸对西瓜幼苗生长及枯萎病发生的作用[J]. 中国农业大学学报,2003,8(1):83-86.