

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.020

孙敬国, 王昌军, 孙光伟, 等. 连作年限对植烟根际土壤化感物质积累的影响——以湖北黄棕壤烟田为例. 土壤, 2021, 53(1): 148–153.

# 连作年限对植烟根际土壤化感物质积累的影响——以湖北黄棕壤烟田为例<sup>①</sup>

孙敬国, 王昌军, 孙光伟, 冯吉, 覃光炯, 吴哲宽, 余振, 李建平, 陈振国\*

(湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030)

**摘要:** 为明确烤烟不同连作年限对土壤化感物质积累的影响, 以湖北典型的植烟黄棕壤为例, 采用甲醇提取-乙酸乙酯 3 次萃取-GC-MS 检测方法, 分析其根际土壤中化感物质的组成和含量。结果共检测出化感物质 5 类 13 种, 其中邻苯二甲酸、对羟基苯甲醛和邻苯二甲酸二异辛酯等在以往植烟土壤研究中未见报道; 化感物质含量随连作年限的延长呈增加趋势, 与种植 1 a 相比, 烤烟连作 10 a 后, 邻苯二甲酸, 苯甲酸, 对苯二甲酸, 邻苯二甲酸二异丁酯, 邻、对二叔丁基苯酚含量和 3-甲氧基-4-羟基苯甲醛的含量均增加 10 倍以上, 从而可能降低烟叶产质量。

**关键词:** 烤烟; 连作年限; 化感物质; 黄棕壤; 湖北

中图分类号: S151.9 文献标志码: A

## Effects of Tobacco Continuous Cropping on Allelochemicals Accumulation in Rhizosphere Soil ——A Case Study of Yellow Brown Soil of Hubei

SUN Jingguo, WANG Changjun, SUN Guangwei, FENG Ji, QIN Guangjiong, WU Zhekuan, YU Zhen, LI Jianping, CHEN Zhenguo\*

(Hubei Academy of Tobacco Science, Wuhan 430030, China)

**Abstract:** Allelochemicals are secondary metabolites or transformants released from plants into the environment and can influence the nearby plants harmfully or beneficially. In this study, the allelochemicals in typical yellow brown soils with different years of tobacco continuous cropping were detected by GC-MS after being extracted by methanol and ethyl acetate respectively. The results showed that in total 13 kinds of allelochemicals were detected, including 5 kinds of the acids, 3 kinds of the esters, 2 kinds of the phenolics, 2 kinds of the aldehydes and 1 kind of the alcohols, among of which, phthalic acid, p-hydroxybenzaldehyde and di (2-ethylhexyl) phthalate were first reported in tobacco study. The contents of allelochemicals in rhizosphere soil showed an increasing trend with the year of tobacco continuous cropping. Comparing with 1 a of tobacco planting, the contents of phthalic acid, benzoic acid, terephthalic acid, diisobutyl phthalate, 3,4-di-tert-butyl-pheno and 3-Methoxy-4-formylphenol increased more than 10 times under 10 a continuous cropping, which could possibly reduce or deteriorate the yield and quality of tobacco.

**Key words:** Flue-cured tobacco; Continuous cropping year; Allelochemicals; Yellow-brown soil; Hubei

烤烟是忌连作作物, 连作造成土壤养分失调, 抑制土壤生物化学过程, 影响烟草正常的生长发育, 最终降低烤烟产量和品质<sup>[1-2]</sup>。

湖北烟区是我国重要的烟叶产区之一, 但烟田主要分布在鄂西山地丘陵区, 由于受耕地面积有限、经济利益驱动和种植条件等因素的制约, 烤烟连作现象严重。2014 年湖北省烟草科学研究院的调查发现,

湖北省约 1/4 的烟田连作达 10 a 以上, 由于连作障碍, 植烟土壤理化性质变差, 烟叶产质量下降, 优质烟区不断萎缩。

连作不同程度地影响了作物的植株形态、叶片的光合生理特性和活性氧代谢<sup>[3]</sup>, 最终, 导致作物生长状况变差、产量降低和品质下降。因此, 连作障碍已经成为农业可持续发展的重大问题之一<sup>[4]</sup>, 也是国内

①基金项目: 中国烟草总公司重点项目(110201902005)资助。

\* 通讯作者(hbskysl@163.com)

作者简介: 孙敬国(1981—), 男, 山西长治人, 高级农艺师, 主要从事烟田土壤酸化改良及连作障碍消减等方面研究。E-mail: sunjg596@hotmail.com

外长期面临的难题之一<sup>[5]</sup>。关于连作障碍,有多种学说,其中,化感物质被认为是造成连作障碍的原因之一<sup>[6]</sup>,其被认为是植物中的次生或次级代谢物质<sup>[7-10]</sup>,苯甲酸和对羟基苯甲酸是目前被发现存在于多数植物根分泌物中的化感物质<sup>[11]</sup>。

我国对烟草连作障碍的研究报道很多,但主要集中在烟草连作对土壤理化性质、烟叶产量及烟叶化学指标等方面,而研究关于植烟土壤化感物质的报道很少。于会泳等<sup>[12]</sup>研究了种烟 1 a、连作 2 a 和连作 3 a 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤根系分泌物的含量变化,发现含量较高的根系分泌物种类有苯甲酸、4-羟基苯乙酸、3-甲氧基-4-羟基苯乙酸和邻苯二甲酸二辛酯,含量较低的种类有 4-羟基丁酸和甘油。任夏等<sup>[13]</sup>研究发现烟草根系的分泌物对莴苣(*Lactuca saiva*)幼苗表现出毒性。王永豪<sup>[14]</sup>研究了凉攀烟区植烟土壤酚酸类化感物质积累特征及其影响因素,发现温度、光照、海拔、土壤类型与属性、轮作方式均会影响植烟土壤酚酸类化感物质的积累,酚酸类化感物质含量随着植烟年限的增加均表现先升后降或趋于稳定的趋势。黄棕壤是湖北最主要的植烟土壤,但迄今尚无其化感物质方面的报道,为此,本研究针对不同连作年限的黄棕壤烟田,分析其化感物质组成和含量及其与连作年限的关系,旨在为连作障碍消减等相关研究提供理论依据。

## 1 材料及方法

### 1.1 供试土壤

研究区设在湖北省恩施州利川市柏杨坝镇金树坪村,植烟土壤为黄棕壤,选取连续种植烤烟 1 a、烤烟连作 4 a 和 10 a 的 3 类代表性烟田,烤烟完全采摘一周后,在每块代表性烟田内采用 S 形 5~8 点采集茎体(0~30 cm)的根际土壤,充分混匀后采用“四分法”留取 1.5 kg,装入自封保鲜袋带回实验室备用。

### 1.2 样品前处理

土壤化感物质的提取:称取 25 g 风干研磨后过 20 目筛的土壤样品放在 200 ml 的三角瓶中,再加入 100 ml 80% 的甲醇,摇匀后,在摇床上振动提取 3 h,离心,取上清液,旋转蒸发后得到 20 ml 水相,用 1 mol/L HCl 调节 pH 至 3.0,再用乙酸乙酯萃取 3 次,得到乙酸乙酯相,再用 20 ml 8% NaOH 溶液提取 3 次,萃取得到水相用 1 mol/L HCl 调至 pH 3.0,再次用 20 ml 乙酸乙酯相提取 3 次,萃取得到乙酸乙酯相,通过减压浓缩至 1 ml(45 °C),过 0.45 μm 滤膜。

### 1.3 化感物质硅烷化处理

参照胡元森<sup>[15]</sup>硅烷化方法,将乙酸乙酯萃取后的上述浓缩样品中分别加入 0.25 ml 硅烷化试剂(BSTFA:吡啶=5:1),加盖密封后于 80 °C 水浴中衍生 2 h,待测。

### 1.4 化感物质 GC-MS 检测

经硅烷化处理后的各组分根系分泌物采用 Agilent 7890A-5975C 进行仪分析测定。采用电子轰击源,轰击电压 70 eV,扫描范围 M/Z 30-600 AMU,扫描速度 0.2 s 扫全程,离子源温度 230 °C。毛细管柱:HP-5MS 柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),进样口温度 250 °C,柱温 50 °C(2 min),以 6 °C/min 程序升温至 250 °C(保持 15 min)。载气为 He,流量 1 ml/min,进样量为 1 μl。应用 NIST08 质谱数据库,分析质谱图,确定各组分物质名称。

### 1.5 数据处理

采用 SAS 10.0 对数据进行了方差分析,采用 LSD 法进行了多重比较;采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理分析并绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 化感物质 GC-MS 分析

通过对 GC-MS 图谱分析,检测到 13 种化感物质,根据化感物质的性质,分为酸类、脂类、酚类、醛类和醇类物质 5 种物质(表 1)。

表 1 化感物质的种类  
Table 1 The types of allelochemicals

种类	化感物质	数量
酸类	邻苯二甲酸、对羟基苯甲酸、苯甲酸、3-甲氧基-4-羟基苯甲酸、对苯二甲酸	5
酯类	邻苯二甲酸二异丁酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二异辛酯	3
酚类	邻苯二酚, 邻、对二叔丁基苯酚	2
醛类	对羟基苯甲醛、3-甲氧基-4-羟基苯甲醛	2
醇类	丁醇	1

化感物质含量在 5.0 μg/g 以上的物质主要有对羟基苯甲酸、3-甲氧基-4-羟基苯甲酸、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二异辛酯、对羟基苯甲醛和 3-甲氧基-4-羟基苯甲醛。

本次检测出邻苯二甲酸、对羟基苯甲醛、邻苯二甲酸二异辛酯等几种化感物质在其他作物研究中曾有报道,如 Yu 和 Matsui<sup>[16]</sup>检测出黄瓜根系分泌物包括苯丙烯酸、对羟基苯甲酸等 11 种酚酸类物质。王树起等<sup>[17]</sup>检测出大豆根系分泌物包括邻甲氧基苯甲

酸、肉桂酸和 3-硝基邻苯二甲酸。吴辉和郑师章<sup>[18]</sup>检测出木豆根系分泌物包括番石榴酸、苹果酸、苯甲酸、肉桂酸等有机酸。Chou 和 Leu<sup>[19]</sup>检测出水稻根系分泌物包括羟基苯甲酸、香豆酸、丁香酸等。胡元森等<sup>[20]</sup>检测出黄瓜根系分泌物有对羟基苯甲酸、香草酸等酚酸类物质。但几种物质在烟草研究方面尚未见到公开报道,高欣欣<sup>[21]</sup>研究指出,烤烟根系分泌物中主要有苯甲酸、肉桂酸、丁二酸、延胡索酸、

烟碱、棕榈酸等物质,可见,此次的发现说明烤烟在生理代谢过程中也能产生这几种物质。

## 2.2 连作年限对化感物质中酸类物质的影响

化感物质中酸类物质主要指一种带有一个或多个羧基功能团的低分子量碳氢氧化合物。由表 2 可知,本试验检测出酸类物质大小含量顺序表现为:3-甲氧基-4-羟基苯甲酸>对羟基苯甲酸>对苯二甲酸>苯甲酸>邻苯二甲酸。

表 2 烤烟连作年限对根系土壤酸类物质含量的影响( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 2 Effects of tobacco continues cropping on contents of acid substances in rhizosphere soil

连作年限(a)	邻苯二甲酸	对羟基苯甲酸	苯甲酸	3-甲氧基-4-羟基苯甲酸	对苯二甲酸
1	0.19 ± 0.04 C	6.58 ± 0.06 C	0.26 ± 0.03 C	17.56 ± 0.27 C	1.03 ± 0.07 C
4	2.16 ± 0.05 B	16.44 ± 0.09 B	2.88 ± 0.06 B	64.39 ± 0.54 B	5.76 ± 0.17 B
10	8.95 ± 0.08 A	19.73 ± 0.22 A	12.36 ± 0.05 A	99.52 ± 1.64 A	38.65 ± 0.57 A

注:表中同列数据大写字母不同表示不同连作年限间差异达  $P < 0.01$  显著水平,下表同。

酸类化感物质含量随连作年限的延长呈现增加趋势,连作 10 a 与种植 1 a 相比,苯甲酸、邻苯二甲酸、对苯二甲酸、3-甲氧基-4-羟基苯甲酸和对羟基苯甲酸分别增加了 46.54 倍、46.11 倍、36.52 倍、4.67 倍和 2.00 倍。有研究表明,连作植烟土壤中羟基苯甲酸、阿魏酸、香草酸等强化感自毒物质较不植烟土壤会有成倍增长<sup>[22-23]</sup>。

酸类化感物质主要分布在根际区域和土壤环境中,主要通过电离  $\text{H}^+$  酸化土壤、抑制土壤养分吸收或者促进一些病原菌的产生。有研究表明,随连作年限延长,连作土壤有明显变酸的趋势<sup>[14, 24]</sup>,土壤酸化则引起矿质元素间的拮抗作用和对植物的毒害作用,如在酸性条件下有效磷易被固定而降低其有效性。

土壤中酸类化感物质对作物生长有自毒作用,对叔丁基苯甲酸、对羟基苯甲酸等能显著抑制土壤中氮循环,并降低土壤中碱解氮、有效磷、速效钾以及有机质含量,从而对植物生长产生消极影响<sup>[25-26]</sup>,随着连作年限的增加,速效氮和速效钾含量下降<sup>[27]</sup>。刘艳霞等<sup>[28]</sup>研究发现,烟草根系分泌物中的苯甲酸和 3-苯丙酸能同时促进土壤中病原菌生长繁殖。可见,化感物质中酸类物质通过降低土壤 pH、降低土壤速效养分含量及促进病原菌的生长等,抑制作物生长。

## 2.3 连作年限对化感物质中酯类物质的影响

酯类是羧酸的一类衍生物。由表 3 可知,酯类物质大小含量顺序表现为:邻苯二甲酸二丁酯>邻苯二甲酸二异辛酯>邻苯二甲酸二异丁酯。

表 3 连作年限对根际土壤中酯类物质含量的影响( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 3 Effects of tobacco continuous cropping on contents of esters in rhizosphere soil

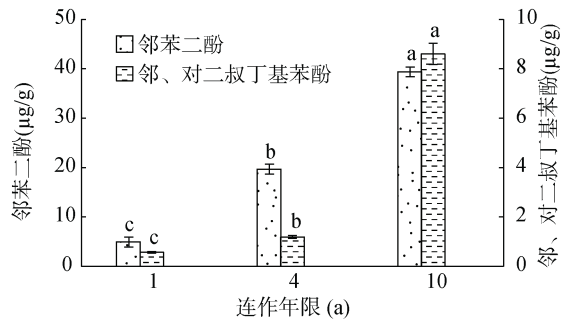
连作年限(a)	邻苯二甲酸二异丁酯	邻苯二甲酸二丁酯	邻苯二甲酸二异辛酯
1	2.50 ± 0.04 C	31.04 ± 0.28 C	13.25 ± 0.67 C
4	17.49 ± 0.46 B	89.24 ± 1.86 B	28.55 ± 1.29 B
10	24.99 ± 0.95 A	143.57 ± 2.15 A	32.53 ± 1.30 A

酯类物质含量随连作年限的延长呈现增加趋势,连作 10 a 与种植 1 a 相比,邻苯二甲酸二异丁酯、邻苯二甲酸二丁酯和邻苯二甲酸二异辛酯含量分别显著增加了 10.00 倍、4.63 倍和 2.46 倍( $P < 0.01$ )。

邻苯二甲酸二异丁酯和邻苯二甲酸二丁酯为多次报道过的植物化感物质<sup>[28-29]</sup>。周宝利等<sup>[29]</sup>在对茄子研究中指出,邻苯二甲酸二异丁酯对茄子黄萎病菌菌丝及茄子各项农艺指标具有“低促高抑”的现象。黄业昌等<sup>[30]</sup>对西瓜的研究发现邻苯二甲酸二丁酯对西瓜的各项农艺指标也同样表现出“低促高抑”的现象。

## 2.4 连作年限对化感物质中酚类物质的影响

酚类物质是重要的植物次生代谢物质之一,主要由植物释放以及植物残体和凋落物分解产生<sup>[31]</sup>。由图 1 可知,根际土壤中邻苯二酚含量介于 4.92 ~ 39.37  $\mu\text{g/g}$ ,邻、对二叔丁基苯酚含量介于 0.57 ~ 8.60  $\mu\text{g/g}$ ,其含量均随种植年限的延长而增加,连作 10 a 与种植 1 a 相比,分别约增加了 8 倍和 15 倍。



(图中小写字母不同表示同一物质在不同连作年限间差异达  $P < 0.05$  显著水平, 下同)

图 1 烤烟连作年限对根际土壤中酚类物质含量的影响  
Fig. 1 Effects of tobacco continuous cropping on phenolic contents in rhizosphere soil

土壤中酚类物质的积累原因是极其复杂的, 既有土壤生物化学方面原因, 又与植株中微量元素缺乏有关; 既与植物本身的异株克生作用有关, 又与土壤微生物活性相关<sup>[32]</sup>。但其在土壤中的积累会引起植物的化感效应, 造成土壤中毒和肥力衰退等问题<sup>[33]</sup>。

近代土壤学关于土壤腐殖质形成理论认为, 土壤酚类物质经多酚氧化酶被氧化为醌, 再由醌和含氮化合物结合变成土壤腐殖质。但多酚氧化酶的最适 pH 为 6.3~7.2<sup>[34]</sup>, 而连作土壤一般为酸性(本研究供试土壤的 pH 介于 4.9~5.6), 酚类物质很难由酚变成醌。

烤烟连作过程中, 种植 1 a 土壤酚类物质含量远低于连作 10 a, 主要是植株根系分泌增加和酚

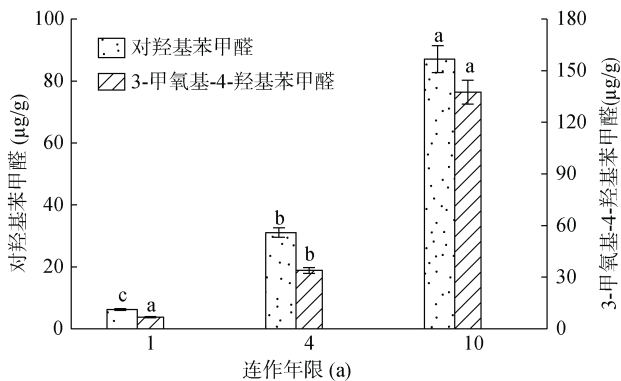


图 2 烤烟连作年限对根际土壤中醛类物质含量的影响  
Fig. 2 Effects of tobacco continuous cropping on aldehydes contents in rhizosphere soil

关于丁醇对作物生长作用研究鲜有报道, 但同样作为低分子量醇类甲醇则有相关研究。1985 年最早发现甲醇能够刺激植物的生长<sup>[37]</sup>, 随后在单子叶植物<sup>[38]</sup>和双子叶植物中<sup>[39]</sup>得到了证实。但 Rowe 等<sup>[40]</sup>研究发现, 在番茄根部施用 5% 的甲醇溶液可显著抑制番茄幼苗茎部的生长, 10% 的甲醇溶液则可导

类物质转化降解弱化造成。相关研究表明<sup>[32]</sup>, 头耕土肥力较高, 土壤微生物活性强, 酚类物质可迅速分解为二氧化碳和水; 而二耕土和三耕土则因肥力逐渐减低, 土壤微生物活性亦相应降低, 酚类物质会有所积累。酚类物质对植物生长的抑制作用, 近代植物生物化学将其归因于吡啶乙酸氧化酶活性的增强, 促使吡啶乙酸氧化分解, 从而不利于作物生长<sup>[35]</sup>。

## 2.5 连作年限对化感物质中醛类物质的影响

化感物质中醛类物质主要指一种带有一个或多个醛基功能团的低分子量碳氢化合物。由图 2 可知, 两种醛类物质含量顺序为 3-甲氧基-4-羟基苯甲醛 > 对羟基苯甲醛。

随着连作年限的增加, 两种醛类化感物质含量均呈现增加趋势, 其中对羟基苯甲醛含量介于 6.22~87.03 µg/g, 3-甲氧基-4-羟基苯甲醛含量介于 6.79~237.50 µg/g; 连作 10 a 与种植 1 a 相比, 两者分别约增加了 14 倍和 35 倍。

韩君和罗小勇<sup>[36]</sup>研究证明一定浓度的对羟基苯甲醛会抑制植物生长, 浓度过高甚至会导致植物死亡, 且双子叶植物相较于单子叶植物更为敏感。

## 2.6 连作年限对化感物质中醇类物质的影响

Rice<sup>[7]</sup>在对化感物质的分类中指出, 醇类物质也属于其中一种。本试验仅检测出丁醇 1 类醇类物质, 其含量随连作年限的延长呈现上升趋势(图 3), 由种植 1 a 的 181.61 µg/g 增加到连作 10 a 的 496.1 µg/g。

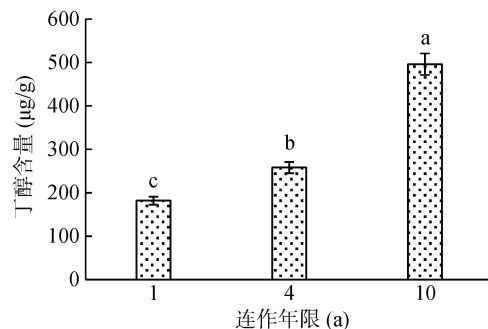


图 3 烤烟连作年限对根际土壤中醇类物质含量的影响  
Fig. 3 Effects of tobacco continuous cropping on alcohol contents in rhizosphere soil

致番茄幼苗死亡。随后关于辣椒、番茄和矮牵牛的研究中也证实了这一点<sup>[41]</sup>。由此可初步推断, 土壤溶液中丁醇超过一定浓度也会对作物生长有抑制作用。

## 3 结论

湖北烤烟连作根际土壤中化感物质包括邻苯二

甲酸、对羟基苯甲酸、苯甲酸、3-甲氧基-4-羟基苯甲酸等 13 种, 其中酸类物质 5 种, 酯类物质 3 种, 酚类物质 2 种, 醛类物质 2 种和醇类物质 1 种。

烤烟连作根际土壤中化感物质含量随连作年限的延长呈现增加趋势, 其中邻苯二甲酸, 苯甲酸, 对苯二甲酸, 邻苯二甲酸二异丁酯, 邻、对二叔丁基苯酚含量和 3-甲氧基-4-羟基苯甲醛增加较为显著。

#### 参考文献:

- [1] 陈凡. 烤烟栽培中植物连作障碍与调控技术探究[J]. 农村经济与科技, 2019(8): 25-26.
- [2] 刘巧真, 郭芳阳, 吴照辉, 等. 烤烟连作土壤障碍因子及防治措施[J]. 中国农学通报, 2012, 28(10): 87-90.
- [3] 侯慧, 董坤, 杨智仙, 等. 连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1068-1076.
- [4] 蔡祖聪, 张金波, 黄新琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 469-476.
- [5] 滕应, 任文杰, 李振高, 等. 花生连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 259-265.
- [6] 王婧怡, 占今舜, 邬彩霞, 等. 植物化感物质及其机理[J]. 饲料博览, 2016(4): 14-17.
- [7] Rice E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press Inc, 1984: 320-324.
- [8] Putnam A R, Defrank J, Barnes J P. Exploitation of allelopathy for weed control in annual and perennial cropping systems[J]. Journal of Chemical Ecology, 1983, 9(8): 1001-1010.
- [9] 宋君. 植物间的化感作用[J]. 生态学杂志, 1990, 9(6): 43-47.
- [10] Bruce Williamson G, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology, 1988, 14(1): 181-187.
- [11] Seal A N, Pratley J E, Haig T, et al. Identification and quantitation of compounds in a series of allelopathic and non-allelopathic rice root exudates[J]. Journal of Chemical Ecology, 2004, 30(8): 1647-1662.
- [12] 于会泳, 申国明, 高欣欣, 等. 烟田土壤化感物质研究[C]. 中国烟草学会 2012 年学术年会. 南京, 2012.
- [13] 任夏, 何小凤, 张忠峰, 等. 烟草根际土壤化感物质的研究[C]. 中国第七届植物化感作用学术研讨会. 昆明, 2015.
- [14] 王永豪. 凉攀烟区植烟土壤酚酸类化感物质积累特征及其影响因素[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [15] 胡元森. 黄瓜连作障碍因子分析及其生物修复措施探讨[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [16] Yu J Q, Matsui Y. Phytotoxic substances in root exudates of cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Journal of Chemical Ecology, 1994, 20(1): 21-31.
- [17] 王树起, 韩丽梅, 杨振明. 不同有机酸对大豆生长的化感效应[J]. 大豆科学, 2002, 21(4): 267-273.
- [18] 吴辉, 郑师章. 根分泌物及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1992, 11(6): 42-47.
- [19] Chou C H, Leu L L. Allelopathic substances and interactions of *Delonix regia* (Boj) Raf[J]. Journal of Chemical Ecology, 1992, 18(12): 2285-2303.
- [20] 胡元森, 李翠香, 杜国营, 等. 黄瓜根分泌物中化感物质的鉴定及其化感效应[J]. 生态环境, 2007(3): 954-957.
- [21] 高欣欣. 烤烟根系分泌物成分鉴定与分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [22] 于会泳, 申国明, 高欣欣. 连作烟田土壤根系分泌物的变化和分解[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(1): 43-47.
- [23] 喻敏, 余均沃, 曹培根, 等. 百合连作土壤养分及物理性状分析[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 377-379.
- [24] 张辰露, 孙群, 叶青. 连作对丹参生长的障碍效应[J]. 西北植物学报, 2005, 25(5): 1029-1034.
- [25] 秦纪洪, 黄雪菊, 孙辉, 等. 低温季节东南亚高山森林土壤多酚氧化酶动态研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1073-1079.
- [26] 吕卫光, 余廷园, 诸海涛, 等. 黄瓜连作对土壤理化性状及生物活性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 119-121.
- [27] 刘方, 卜通达. 连作烤烟土壤养分变化分析[J]. 贵州农学院学报, 1997(2): 1-4.
- [28] 刘艳霞, 李想, 蔡刘体, 等. 烟草根系分泌物酚酸类物质的鉴定及其对根际微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 418-428.
- [29] 周宝利, 陈丰, 刘娜, 等. 邻苯二甲酸二异丁酯对茄子黄萎病及其幼苗生长的化感作用[J]. 西北农业学报, 2010, 19(4): 179-183.
- [30] 黄业昌, 孙吉庆, 陈勇兵. 邻苯二甲酸二丁酯对西瓜光合作用及枯萎病的影响[J]. 北方园艺, 2017(4): 111-115.
- [31] Hättenschwiler S, Vitousek P M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(6): 238-243.
- [32] 何光训. 土壤酚类物质引起植物中毒的植物生理原因[J]. 浙江林学院学报, 1992(3): 339-344.

- [33] 李天杰. 土壤环境学: 土壤环境污染防治与土壤生态保护[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [34] 郑洪元, 张德生. 土壤动态生物化学研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [35] 曹宗巽, 吴相钰. 植物生理学-下册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [36] 韩君, 罗小勇. 南天竹除草活性物质的研究[C]. 中国植物化感作用学术研讨会. 天津, 2011.
- [37] Bhattacharya S, Bhattacharya N C, Bhatnagar V B. Effect of ethanol, methanol and acetone on rooting etiolated cuttings of *vigna radiata* in presence of sucrose and auxin[J]. *Annals of Botany*, 1985, 55(2): 143–145.
- [38] Nonomura A M, Benson A A. The path of carbon in photosynthesis: improved crop yields with methanol[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1992, 89(20): 9794–9798.
- [39] Devlin R M, Bhowmik P C, Karczmarczyk S J. Influence of methanol on plant growth[J]. *Plant Growth Regulation*, 1994, 22(4): 102–108.
- [40] Rowe R N, Farr D J, Richards B A J. Effects of foliar and root applications of methanol or ethanol on the growth of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 1994, 22(3): 335–337.
- [41] Hemming D J B, Criddle R S, Hansen L D. Effects of methanol on plant respiration[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1995, 146(3): 193–198.