

两种酚酸类物质对花生根部土壤养分、酶活性和产量的影响

李庆凯^{1,2} 刘 苹² 唐朝辉³ 赵海军⁴ 王江涛² 宋效宗² 杨 力² 万书波^{4*}

(¹青岛农业大学农学与植物保护学院, 山东青岛 266109; ²山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; ³山东鲁研农业良种有限公司, 济南 250100; ⁴山东省农业科学院, 济南 250100)

摘 要 为探讨连作花生土壤中酚酸类物质的累积与花生连作障碍的关系,通过大田盆栽试验,研究了对羟基苯甲酸、肉桂酸对花生花针期(出苗后 45 d)、结荚初期(出苗后 75 d)、结荚末期(出苗后 105 d)根部土壤养分、酶活性及产量的影响.结果表明:经两种酚酸类物质处理后,花生根部土壤养分和酶活性均发生了明显的变化,以在花针期受到的影响最大,土壤碱解氮、有效磷、有效钾和土壤脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶活性均显著降低;到花生结荚初期和结荚末期,两种物质对土壤养分、酶活性的抑制作用有减弱趋势.初始含量相同时,肉桂酸的化感作用相对较强.高浓度(80 mg·kg⁻¹干土)对羟基苯甲酸、肉桂酸处理分别使每盆花生荚果产量降低了 45.9%、52.8%,单株结果数降低了 46.2%、48.9%.

关键词 对羟基苯甲酸; 肉桂酸; 连作障碍; 花生; 土壤养分; 土壤酶; 产量

Effects of two phenolic acids on root zone soil nutrients, soil enzyme activities and pod yield of peanut. LI Qing-kai^{1,2}, LIU Ping², TANG Zhao-hui³, ZHAO Hai-jun⁴, WANG Jiang-tao², SONG Xiao-zong², YANG Li², WAN Shu-bo^{4*} (¹College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China; ²Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China; ³Shandong Luyan Agricultural Seed Co. Ltd., Ji'nan 250100, China; ⁴Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China).

Abstract: In order to investigate the relationship between the accumulation of phenolic acids in peanut continuous cropping soil and the continuous cropping obstacle of peanut, the effects of p-hydroxy benzoic acid and cinnamic acid on peanut root zone soil nutrients, soil enzyme activities and yield of peanut were studied by pot experiment at three stages of peanut, i.e. the pegging stage of peanut (45 days after seedling), the early podding (75 days after seedling) and the end of podding (105 days after seedling) stages. The results showed that the peanut root zone soil nutrients and enzyme activities changed obviously under the two phenolic acids treatment, especially at the pegging stage of peanut. The soil alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, and soil enzyme activities (urease, sucrose, neutral phosphatase) were decreased significantly. At the early and end of podding stages of peanut, the effects of the two phenolic acids on peanut root zone soil nutrients and soil enzyme activities were under a weakening trend. The allelopathy of cinnamic acid was stronger than that of p-hydroxy benzoic acid at the same initial content. The pod yield per pot was reduced by 45.9% and 52.8%, while the pod number of per plant was reduced by 46.2% and 48.9% at higher concentration (80 mg·kg⁻¹ dry soil) of p-hydroxy benzoic acid and cinnamic acid treatments, respectively.

Key words: p-hydroxy benzoic acid; cinnamic acid; continuous cropping obstacle; peanut; soil available nutrients; soil enzyme; yield.

本文由山东省自然科学基金项目(ZR2014YL025)、国家科技支撑计划项目(2014BAD11B04)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-14)和山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室项目(ZDSYS2014)资助 This work was supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2014YL025), the Supporting Plan of National Science and Technology of China (2014BAD11B04), the Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System (CARS-14) and Shandong Provincial Key Laboratory of Crops Genetic Improvement, Ecology and Physiology (ZDSYS2014).

2015-09-23 Received, 2016-02-04 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wansb@saas.ac.cn

花生是我国重要的油料经济作物,常年种植面积在 470 万 hm^2 左右,约占油料作物播种总面积的 35%。近年来,伴随着农业种植业结构的调整,花生的生产规模持续扩大,种植方式不断向规模化和集约化方向发展,由于花生种植效益相对较高及种植土壤生态条件的限制,主产区常常多年连片种植,连作面积越来越大。试验表明,花生是一种对连作较敏感的作物,连作 2~3 年,荚果减产 19.8%~33.4%^[1]。山东省每年大约有连作田 23.33 万~26.67 万 hm^2 ,由连作而造成的减产在 15 万 t 以上^[2]。花生连作障碍已成为当前我国花生生产中亟待解决的关键科学问题。

笔者前期的研究发现,花生根系分泌物的化感作用与连作障碍间有着密切关系,且连作花生土壤中化感物质随连作年限增加有增加的趋势,并分离鉴定出花生根系分泌物中具有自毒作用的多种化感物质^[3-8]。其中,酚酸类化合物是土壤中存在的一类重要的有机物质,通过有机残体分解、根系分泌等途径进入土壤,影响作物生长^[9-10]。研究表明,酚酸类物质是使作物产生连作障碍的重要因素之一^[11-12]。酚酸类物质在土壤中存在降解、部分被土壤颗粒吸附和微生物吸收等现象^[13-14]。Haider^[15]将 ^{14}C 标记的对羟基苯甲酸、紫丁香酸和香草酸添加到土壤中,发现一周内,90%的酚酸类物质被分解。因此,通过向土壤中添加外源酚酸类物质的途径来研究其化感作用,有必要适当增加酚酸类物质的初始含量。

对羟基苯甲酸、肉桂酸是广泛存在于植物中的一类重要的次生代谢产物,被许多学者普遍认为是作物生长的抑制剂^[11-12]。以往化感方面的研究主要侧重于化感物质对植物生理状况及植物生长的影响,而较少涉及到土壤养分和土壤酶活性的变化^[6,16]。土壤中有效养分的含量和土壤酶活性对作物生长和产量至关重要,土壤养分失调和土壤酶活性下降是造成花生连作障碍的主要原因之一^[17]。为此,本研究以田间土壤为介质,采用盆栽试验的方法研究了花生根系分泌物成分对羟基苯甲酸、肉桂酸对花生根部土壤养分、土壤酶活性及花生产量的影响,旨在探讨花生连作后土壤中酚酸类化合物的累积与花生连作障碍间的关系,为花生连作障碍机理的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年 5—9 月进行,供试花生品种为

大果型的花育 22 号。从山东省农业科学院饮马泉试验农场收集未种植过花生的土壤,过 2 mm 筛混匀。每盆装土 18 kg,装土前施用底肥生之道复合肥 2.6 g、艳阳天复合肥 2.6 g、商品有机肥 12.4 g。将底肥与土壤混合均匀后再装盆,共计 80 盆,浇水润土后播种花生,每盆 3 穴,每穴两粒,覆膜。两周后出苗揭膜,每穴保留健苗一株。出苗后 20 d,选取 60 盆长势一致的花生。称取一定量的分析纯对羟基苯甲酸(A)、肉桂酸(B),分别先用 120 mL 乙醇溶解,再用蒸馏水稀释配制成 $0.36 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.72 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 酚酸处理液。用配制好的酚酸溶液处理上述花生,每盆浇灌 2 L,使对羟基苯甲酸和肉桂酸的初始含量分别达到 40、80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土,分别用 A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 表示。对照用等量加入同等比例乙醇的蒸馏水处理,每个处理 12 盆,每次取样 3 盆,即 3 个重复。试验在自然气候条件下进行,试验期间根据干旱程度适量补充等量水分。

1.2 土壤样品的采集

分别于花针期(出苗后 45 d)、结荚初期(出苗后 75 d)、结荚末期(出苗后 105 d)取土样,取样时采集根系附近(离主根 2~4 cm)土壤样品,每盆随机取 3 钻(内径 2.5 cm),采样深度为 0~15 cm,充分混匀后装在密封塑料袋中备用。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤养分的测定 采用碱解扩散法测定碱解氮,钼酸铵显色法测定有效磷,火焰分光光度法测定有效钾,重铬酸钾氧化-外加热法测定有机质含量^[18]。

1.3.2 土壤酶活性的测定 将采集的土样于室温下风干并过 1 mm 筛。采用水杨酸比色法测定蔗糖酶活性,苯酚钠比色法测定脲酶活性,磷酸苯二钠比色法测定中性磷酸酶活性^[19]。

1.3.3 花生产量的测定 成熟期收获,待花生自然晾干后,分别测定各处理花生的每盆荚果产量、单株结果数、千克果数、饱果率和出仁率。

1.4 数据处理

采用 Excel 处理试验数据,SPSS 16.0 数据处理系统进行处理间各指标的差异显著性检验,显著性水平设为 $\alpha=0.05$,采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 对羟基苯甲酸、肉桂酸对土壤养分含量的影响

2.1.1 土壤碱解氮 从图 1 可以看出,经肉桂酸、对羟基苯甲酸处理后,花生土壤碱解氮含量与对照相

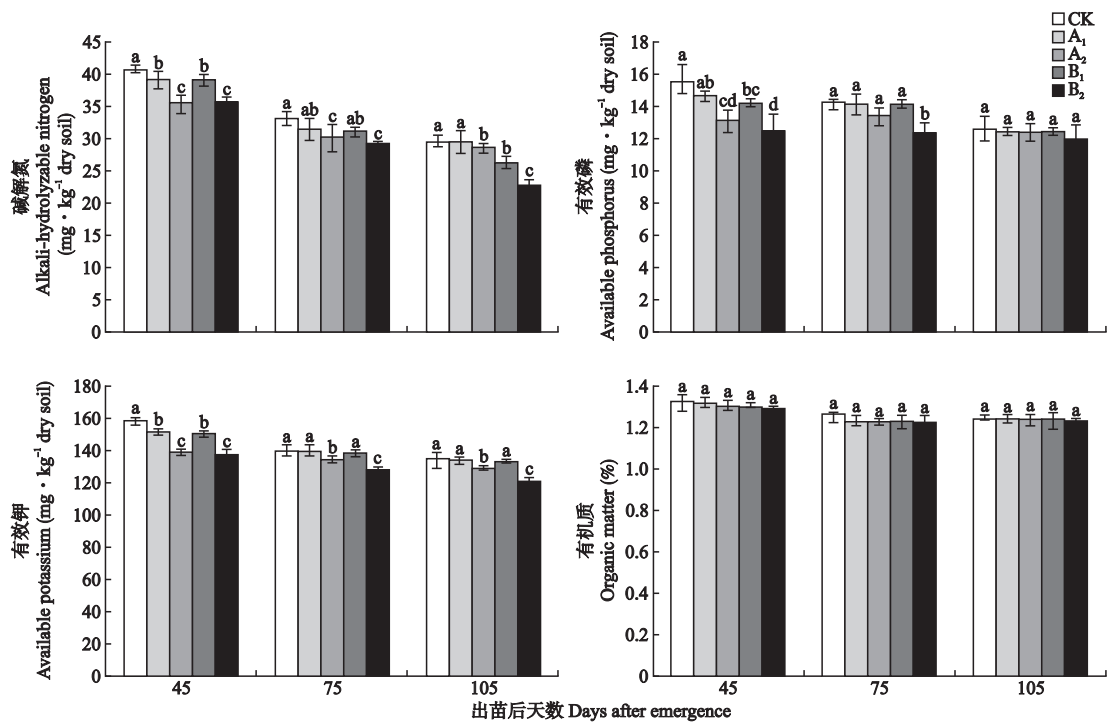


图1 对羟基苯甲酸、肉桂酸对土壤碱解氮、有效磷、有效钾和有机质含量的影响
Fig.1 Effects of p-hydroxy benzoic acid and cinnamic acid on alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter contents of soil.
CK: 对照 Control; A₁: 40 mg · kg⁻¹对羟基苯甲酸 40 mg · kg⁻¹ p-hydroxy benzoic acid; A₂: 80 mg · kg⁻¹对羟基苯甲酸 80 mg · kg⁻¹ p-hydroxy benzoic acid; B₁: 40 mg · kg⁻¹肉桂酸 40 mg · kg⁻¹ cinnamic acid; B₂: 80 mg · kg⁻¹肉桂酸 80 mg · kg⁻¹ cinnamic acid. 不同字母表示处理间差异显著 (P<0.05) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

比均降低.其中,在花生出苗后 45 和 75 d,两种酚酸类物质处理的土壤碱解氮含量均显著低于对照;在出苗后 105 d,低浓度的对羟基苯甲酸对土壤碱解氮含量的抑制效应不显著,当对羟基苯甲酸的初始含量升高至 80 mg · kg⁻¹时,花生土壤碱解氮含量显著低于对照,而两种浓度肉桂酸处理的土壤碱解氮均显著低于对照.3 次取样,高浓度酚酸类物质处理的花生土壤碱解氮含量均显著低于低浓度处理.

2.1.2 土壤有效磷 由图 1 可以看出,肉桂酸和对羟基苯甲酸处理的花生土壤有效磷含量均低于对照.其中,在花生出苗后 45 d,加入两种化感物质的土壤有效磷含量均显著低于对照,肉桂酸、对羟基苯甲酸初始含量为 40 mg · kg⁻¹时,土壤有效磷含量分别比对照降低 9.6%、6.4%.与对照相比,高浓度肉桂酸、对羟基苯甲酸处理土壤的有效磷含量分别降低了 20.2%、16.5%.在花生出苗后 75 d,当肉桂酸初始含量为 80 mg · kg⁻¹时,土壤有效磷含量显著低于对照和其他处理.在花生出苗后 105 d,各处理间差异不显著.

2.1.3 土壤有效钾 肉桂酸、对羟基苯甲酸的加入均降低了花生土壤有效钾的含量(图 1).在花生出

苗后 45 d,与对照相比,两种含量的肉桂酸和对羟基苯甲酸处理均显著降低了土壤有效钾含量,其中,低浓度和高浓度对羟基苯甲酸处理分别降低了 4.0%、12.2%,肉桂酸处理分别降低了 5.3%、13.1%.在花生出苗后 75 和 105 d,肉桂酸和对羟基苯甲酸初始含量为 40 mg · kg⁻¹时,土壤有效钾含量均低于对照,但差异不显著.3 次取样,高浓度酚酸类物质处理的花生土壤有效钾含量均显著低于低浓度处理.

2.1.4 土壤有机质 从图 1 可以看出,花生土壤在加入肉桂酸和对羟基苯甲酸后,在出苗后 45、75 和 105 d,有机质含量均降低,但各处理间差异不显著.

2.2 对羟基苯甲酸、肉桂酸对土壤酶活性的影响
2.2.1 土壤脲酶活性 由图 2 可知,两种酚酸类物质处理均降低了花生土壤脲酶活性.在花生出苗后 45 和 75 d,经肉桂酸和对羟基苯甲酸处理的花生土壤脲酶活性均显著低于对照.其中,相同含量的两种酚酸类物质中,肉桂酸对土壤脲酶活性的抑制作用较强.在花生出苗后 105 d,初始含量为 40 mg · kg⁻¹的对羟基苯甲酸处理对土壤脲酶活性的抑制效应不显著,而两种含量的肉桂酸处理均显著降低了花生土壤脲酶活性.3 次取样,高浓度酚酸类物质处理的

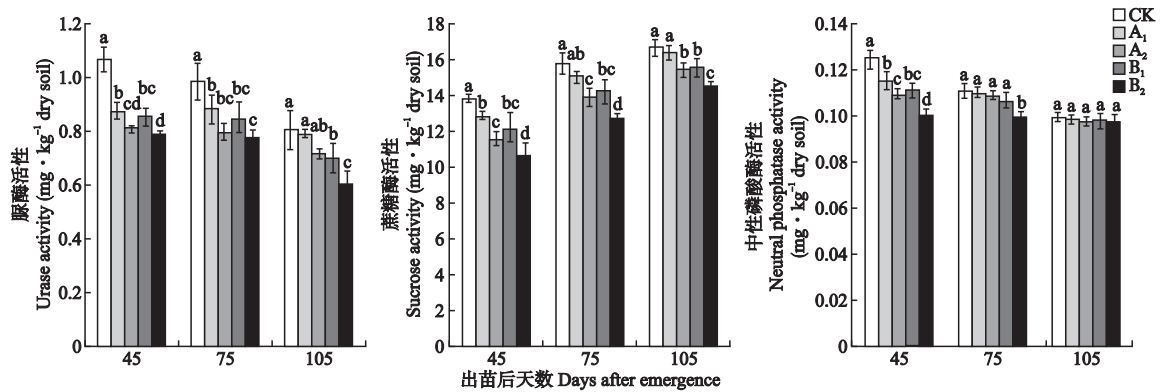


图2 对羟基苯甲酸、肉桂酸对土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性的影响
Fig.2 Effects of p-hydroxy benzoic acid and cinnamic acid on activities of urase, sucrase and neutral phosphatase of soil.

表1 对羟基苯甲酸、肉桂酸对花生产量、产量构成因素的影响
Table 1 Effects of p-hydroxy benzoic acid and cinnamic acid on yield and yield components of peanut

处理 Treatment	每盆荚果产量 Pod yield (g · pot ⁻¹)	单株结果数 Pods per plant (ind)	千克果数 Pods per kg (ind)	饱果率 Full pod rate (%)	出仁率 Shelling rate (%)
CK	174.33±4.04a	22.07±0.21a	852.33±2.52c	68.50±0.75a	76.37±0.45a
A ₁	119.67±1.53b	14.83±0.35b	960.00±5.29b	54.67±0.60b	69.07±0.32b
A ₂	94.33±2.52d	11.87±0.29d	1156.33±1.53a	43.60±1.01c	59.13±0.35c
B ₁	112.00±2.00c	14.23±0.40c	968.00±1.00b	53.77±0.45b	68.77±0.38b
B ₂	82.33±2.52e	11.27±0.31e	1161.33±6.43a	42.77±0.67c	58.60±0.10c

不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

花生土壤脲酶活性均显著低于低浓度处理。

2.2.2 土壤蔗糖酶活性 从图2可以看出,两种酚酸类物质处理均降低了花生根部土壤蔗糖酶活性,在花生出苗后45和75 d,各处理土壤蔗糖酶活性均显著低于对照.在两种酚酸类物质初始含量相同的情况下,肉桂酸对土壤蔗糖酶活性抑制作用较强.在花生出苗后105 d,低浓度对羟基苯甲酸处理的土壤蔗糖酶活性低于对照,但差异不显著,其他处理均显著低于对照.3次取样,高浓度酚酸类物质处理的土壤蔗糖酶活性均显著低于低浓度处理。

2.2.3 土壤中中性磷酸酶活性 在花生出苗后45 d,对羟基苯甲酸和肉桂酸处理均显著降低了土壤中中性磷酸酶活性.其中,初始含量为40 mg · kg⁻¹的肉桂酸、对羟基苯甲酸处理分别比对照降低了10.6%、7.3%,初始含量为80 mg · kg⁻¹的肉桂酸、对羟基苯甲酸处理分别比对照降低了19.7%、12.4%.在花生出苗后75 d,高浓度肉桂酸处理土壤中中性磷酸酶活性显著低于对照,而其他处理与对照差异不显著.在花生出苗后105 d,各处理间差异不显著(图2)。

2.3 对羟基苯甲酸、肉桂酸对花生产量的影响

由表1可以看出,两种酚酸类物质处理均显著降低了花生产量.酚酸类物质含量越高,花生减产越显著.与对照相比,花生每盆荚果产量、单株结果数、

饱果率和出仁率均显著降低,千克果数显著增加.其中,低浓度对羟基苯甲酸、肉桂酸处理后,花生每盆荚果产量分别降低了31.4%、35.8%,单株结果数分别降低了32.8%、35.5%;高浓度两种酚酸类物质分别使花生每盆荚果产量降低了45.9%、52.8%,单株结果数分别降低了46.2%、48.9%.当两种酚酸类物质初始含量相同时,肉桂酸对花生每盆荚果产量、单株结果数的影响显著强于对羟基苯甲酸,而对饱果率、出仁率、千克果数的影响,两种物质间差异不显著。

3 讨 论

花生是一种对连作较敏感的作物,本文通过向花生土壤添加对羟基苯甲酸、肉桂酸的方式,研究了酚酸类物质对花生根部土壤养分、土壤酶活性和花生产量的影响.研究表明,经两种酚酸类物质处理的花生根部土壤碱解氮、有效磷、有效钾和有机质含量均降低,土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性亦下降,花生产量显著降低,而且初始含量越高,其对花生根部土壤和产量的影响越大.这与以往的研究结果基本一致^[6,20-21]。

土壤酶活性在一定程度上反映土壤肥力、物质转化和环境的变化,可作为衡量土壤生物学活性和土壤生产力的指标^[22].林瑞余等^[23]在研究不同化感

潜力水稻根际土壤酶时发现,化感水稻抑制了根际土壤的脱氢酶、过氧化物酶、多酚氧化酶、脲酶、纤维素分解酶活性。吕可等^[20]研究发现,花椒叶浸提液浇灌盆栽花椒幼苗可使根际土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性明显低于非根际土壤。本研究发现,两种酚酸类物质均不同程度降低了花生根部土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性。其中,以花针期(出苗后 45 d)受影响最为显著。土壤酶主要来自土壤微生物和植物根系分泌物^[6],参与有机质的分解和腐殖质的形成,是土壤生物活性的综合表现。酚酸类物质进入土壤后,会显著影响土壤微生物生物量、活性、多样性和群落结构,选择性地增加土壤中特殊的微生物种类^[24-25]。有研究表明,随着花生连作年限的增加,土壤中对羟基苯甲酸、香草酸和香豆酸含量增加,导致花生根际土壤中细菌和放线菌的数量明显减少,真菌数量增多^[26]。酚酸类物质也会导致土壤微生物胞内酶、胞外酶比例失调或改变酶的构象,从而影响酶的活性^[27-28]。其次,土壤 pH 值与土壤酶活性有关,加入的两种酚酸类物质降低了土壤 pH 值,从而降低了土壤酶活性^[29]。另外,酚酸类物质会影响植物根系的生长和分泌,对羟基苯甲酸、肉桂酸的加入可能导致根系分泌物主要成分发生改变^[11]。酚酸类物质也可能会直接作用于土壤酶,从而影响土壤酶活性。

化感物质和土壤微生物是相互影响的,酚酸类物质可以被土壤吸附或被土壤中的微生物作用转化为其他的物质或被微生物吸收,使得土壤中酚酸的浓度发生变化^[14,30]。李亮亮等^[14]研究了间苯三酚、邻苯二甲酸、苯甲酸、肉桂酸 4 种酚酸在土壤中的降解,发现土壤中 4 种酚酸含量在 3 d 内下降速率最快,苯甲酸和肉桂酸在土壤中的降解速率稍慢于间苯三酚和邻苯二甲酸。本研究发现,在花生结荚初期(花生出苗后 75 d)和结荚末期(花生出苗后 105 d),两种酚酸类物质对土壤酶的抑制作用减弱,这可能与酚酸类物质的降解有关。另外,初始含量相同的两种物质之间,肉桂酸的化感作用较强,表明酚酸对土壤酶的作用效果与酚酸的种类和含量有关^[28]。

土壤酶活性减弱会降低土壤有效养分的含量^[6]。本研究表明,两种酚酸类物质均降低了土壤碱解氮、有效磷、有效钾和有机质含量。这与母容等^[21]和吕卫光等^[31]研究的添加外源酚酸类物质减少土壤有效养分含量的结果一致。与花生根部土壤酶活性受到的影响类似,在花针期(花生出苗后 45 d),

土壤养分受到的影响最大。随着花生生育期的延长,抑制作用逐渐减弱。然而,本试验中两种酚酸类物质对花生根部土壤有机质的影响不显著,这与 Inderjit 等^[32]的研究结果不一致,这可能是因为酚酸类物质的种类、处理浓度、处理时间以及土壤类型不同所致。

化感物质在土壤中积累到一定浓度时,会通过影响植物生理代谢、土壤微生态环境等多种方式影响作物生长^[6,33-34],造成作物产量的降低。王艳芳等^[35]研究了连作苹果土壤中酚酸类物质对平邑甜茶幼苗的影响,发现酚酸类物质降低了幼苗根系中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,增加了过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)以及丙二醛(MDA)的含量。刘莘等^[6]研究发现,土壤中的脂肪酸含量较高时显著降低了花生叶片中叶绿素含量、根系活力和土壤酶(蔗糖酶、脲酶、磷酸酶)活性,从而造成植物光合作用减弱、养分吸收能力减弱、土壤有效养分含量降低。因此,化感物质降低了作物光合作用、土壤有效养分和根系吸收能力,可能是导致花生产量降低的原因之一。本研究发现,对羟基苯甲酸、肉桂酸均降低了土壤有效养分含量和土壤酶活性,影响了花生每盆荚果产量、单株结果数、千克果数、饱果率和出仁率,显著降低了花生产量,且浓度越高,抑制作用越强。表明花生连作土壤中对羟基苯甲酸、肉桂酸的累积是导致土壤养分失调、土壤酶活性下降和花生产量降低的原因之一,与花生连作障碍的产生有着密切的关系,但对羟基苯甲酸、肉桂酸等化感物质对土壤养分和土壤酶活性的作用机理有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Zheng Y-P (郑亚萍), Wang C-B (王才斌), Huang S-Z (黄顺之), et al. Research on relieving peanut continuous cropping stress. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* (中国油料作物学报), 2008, **30**(3): 384-388 (in Chinese)
- [2] Liu P, Wan SB, Jiang LH, et al. Autotoxic potential of root exudates of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Allelopathy Journal*, 2010, **26**: 197-206
- [3] Liu P (刘 莘), Zhao H-J (赵海军), Wan S-B (万书波), et al. Effect of continuous cropping on allelopathy of peanut root exudates. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2011, **19**(3): 639-644 (in Chinese)
- [4] Liu P (刘 莘), Zhao H-J (赵海军), Wan S-B (万书波), et al. Autotoxic potential of peanut (*Arachis hypogaea*) root exudates. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* (中国油料作物学报), 2010, **32**(3): 431-435 (in Chinese)

- [5] Liu P, Liu ZH, Wang CB, *et al.* Effects of three long-chain fatty acids present in peanut (*Arachis hypogaea* L.) root exudates on its own growth and the soil enzymes activities. *Allelopathy Journal*, 2012, **29**: 13–24
- [6] Liu P (刘 苹), Zhao H-J (赵海军), Zhong Z-W (仲子文), *et al.* The effects of three root exudated fatty acids on peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and soil enzymes activities. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(11): 3332–3339 (in Chinese)
- [7] Liu P (刘 苹), Jiang L-H (江丽华), Wan S-B (万书波), *et al.* Studies on allelopathy of peanut root exudates on root rot fungi and N-fixing bacteria. *Journal of Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), 2009, **11**(4): 107–111 (in Chinese)
- [8] Liu P (刘 苹), Zhao H-J (赵海军), Tang Z-H (唐朝辉), *et al.* Effects of continuous cropping on root exudates of different resistance peanut (*Arachis hypogaea* L.) varieties and allelochemicals content in soil. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* (中国油料作物学报), 2015, **37**(4): 467–474 (in Chinese)
- [9] Wu F-Z (吴凤芝), Zhao F-Y (赵凤艳). Study on root exudates and continues cropping obstacle. *Journal of Northeast Agricultural University* (东北农业大学学报), 2003, **34**(1): 114–118 (in Chinese)
- [10] Lin S-Z (林思祖). Autointoxication of Chinese fir. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(6): 661–664 (in Chinese)
- [11] Wang C (王 闯), Xu G-Y (徐公义), Ge C-C (葛长城), *et al.* Progress on the phenolic acid substances and plant soil sickness. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2009(3): 134–137 (in Chinese)
- [12] Saviranta NMM, Julkunen-Tiitto R, Oksanen E, *et al.* Leaf phenolic compounds in red clover (*Trifolium pratense* L.) induced by exposure to moderately elevated ozone. *Environmental Pollution*, 2010, **158**: 440–446
- [13] Leitao AL, Duarte MP, Santos OJ, *et al.* Degradation of phenol by a halo tolerant strain of *Penicillium chrysogenum*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, **59**: 220–225
- [14] Li L-L (李亮亮), Li T-L (李天来), Zhang E-P (张恩平), *et al.* Experimental study on degradation of four phenolic acids in soil. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2010, **41**(6): 1460–1465 (in Chinese)
- [15] Haider K. Decomposition of specificity carbon-14 labeled benzoic and cinnamic acid derivatives in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, **39**: 657–667
- [16] Gu Y, Wang P, Kong CH. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety. *European Journal of Soil Biology*, 2009, **45**: 436–441
- [17] Sun X-S (孙秀山), Feng H-S (封海胜), Wan S-B (万书波), *et al.* Changes of main microbial strains and enzymes activities in peanut continuous cropping soil and their interactions. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2001, **27**(5): 617–621 (in Chinese)
- [18] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agro-chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [19] Guan S-Y (关松荫). Soil Enzymes and Their Methodology. Beijing: China Agriculture Press, 1983 (in Chinese)
- [20] Lü K (吕 可), Pan K-W (潘开文), Wang J-C (王进闯), *et al.* Effects of *Zanthoxylum bungeanum* leaf extract on soil microbe quantity and enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(9): 1649–1654 (in Chinese)
- [21] Mu R (母 容), Pan K-W (潘开文), Wang J-C (王进闯), *et al.* Effects of ferulic acid, p-hydroxybenzoic acid and their mixture on mineral nitrogen and relative microbial function groups in forest soils. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(3): 793–800 (in Chinese)
- [22] Bhanu P, Ravindra S, Priyanka S, *et al.* Efficacy of chemically characterized *Piper betle* L. essential oil against fungal and aflatoxin contamination of some edible commodities and its antioxidant activity. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, **142**: 114–119
- [23] Lin R-Y (林瑞余), Yu C-P (于翠萍), Rong H (戎红), *et al.* Rhizospheric soil enzyme activity of allelopathic rice at seedling stage. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2008, **16**(2): 302–306 (in Chinese)
- [24] Qu XH, Wang JG. Effect of amendments with different phenolic acids on soil microbial biomass, activity, and community diversity. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**: 172–179
- [25] Kong CH, Wang P, Zhao H, *et al.* Impact of allelochemical exuded from allelopathic rice on soil microbial community. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 1862–1869
- [26] Li PD, Wang XX, Li YL, *et al.* The contents of phenolic acids in continuous cropping peanut and their allelopathy. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**: 2128–2134
- [27] Ma Y-H (马云华), Wang X-F (王秀峰), Wei M (魏珉), *et al.* Accumulation of phenolic acids in continuously cropped cucumber soil and their effects on soil microbes and enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2149–2153 (in Chinese)
- [28] Yuan G-L (袁光林), Ma R-X (马瑞霞), Liu X-F (刘秀芬), *et al.* Effects of allelochemicals on uricase activity. *Environmental Science* (环境科学), 1998, **19**(2): 55–57 (in Chinese)
- [29] Yao HY, Bowman D, Rufty T, *et al.* Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: Implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 1425–1432
- [30] Walker TS, Bais HP, Grotewold E, *et al.* Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiology*, 2003, **132**: 44–51
- [31] Lü W-G (吕卫光), Shen Q-R (沈其荣), Yu T-Y (余廷园), *et al.* The effect of added phenolic acids on soil enzyme activities and nutrients. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(6):

845–849 (in Chinese)

[32] Inderjit, Mallik AU. Effects of phenolic compounds on selected soil properties. *Forest Ecology and Management*, 1997, **92**: 11–18

[33] Zhou XG, Wu FZ. p-Coumaric acid influenced cucumber rhizosphere soil microbial communities and the growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* Owen. *PLoS One*, 2012, **7**(10): e48288

[34] Zhang Y, Gu M, Xia XJ, *et al.* Alleviation of autotoxin-induced growth inhibition and respiration by sucrose in *Cucumis sativus* (L.). *Allelopathy Journal*, 2010, **25**: 147–154

[35] Wang Y-F (王艳芳), Pan F-B (潘凤兵), Zhan X (展 星), *et al.* Effects of five kinds of phenolic acid on the function of mitochondria and antioxidant systems in roots of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(19): 6566–6573 (in Chinese)

作者简介 李庆凯,男,1989 年生,硕士研究生.主要从事花生连作障碍研究.E-mail: 1242502537@ qq.com

责任编辑 张凤丽