

李春龙. 外源化感物质香豆酸对豌豆种子萌发、幼苗根际土壤酶活性及土壤微生物的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 94–97.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2018.04.023

# 外源化感物质香豆酸对豌豆种子萌发、幼苗根际土壤酶活性及土壤微生物的影响

李春龙

(成都农业科技职业学院现代农业分院, 成都温江 611130)

**摘要:**以豌豆为受试植物, 研究不同浓度外源化感物质香豆酸( $10^{-7}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$  mol/L)对豌豆种子萌发、幼苗根际土壤酶活性以及土壤微生物数量的影响。结果表明, 香豆酸对豌豆种子萌发的各指标均表现出“低浓度促进、高浓度抑制”的效应; 随着香豆酸浓度的增加, 除了土壤酸性磷酸酶活性增大外, 其他 5 种所测土壤酶活性均呈下降趋势, 所有土壤微生物数量均呈递减趋势; 并且豌豆幼苗根际土壤微生物数量均与土壤酸性磷酸酶活性呈极显著负相关, 而与其他 5 种土壤酶活性以及土壤 pH 值呈极显著正相关。

**关键词:**化感物质; 香豆酸; 豌豆; 种子萌发; 土壤酶; 土壤微生物

**中图分类号:** S643.301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002–1302(2018)04–0094–03

香豆酸、香豆素、羟基肉桂酸、阿魏酸等均属于酚酸类物质, 现已公认化感物质<sup>[1]</sup>。化感物质是植物化感作用的媒介, 主要通过挥发或雨雾、植物表面淋溶、植物根系分泌、植物残体或凋落物分解等 4 种途径释放并进入环境, 被受体植物吸收而起作用<sup>[2–3]</sup>。当化感物质通过植株残体分解以及根系分泌等途径进入土壤, 使得土壤养分、酶活性以及根际微生物等受到影响, 进而会影响作物的正常生长<sup>[4–5]</sup>。

豌豆(*Pisum sativum* L.)为豆科豌豆属栽培种, 一年生或越年生, 是一种很好的速生作物, 适应范围极广, 从高寒山区到炎热坝区都能生长, 出苗后 40 d 以上便可采收嫩尖。豌豆是世界性食用豆类作物, 主要作蔬菜和粮食使用, 也可作绿肥和饲料, 是集粮、菜、肥、饲于一体的多用途作物<sup>[6]</sup>。豌豆被认为是最不耐连作的豆科作物之一<sup>[7]</sup>。目前, 国内外对豌豆化感作用的研究主要集中在豌豆自毒作用上<sup>[8–9]</sup>, 有关外源纯化感物质对豌豆化感作用的研究鲜见报道。本试验研究不同浓度的外源化感物质香豆酸对豌豆种子萌发、幼苗根际土壤酶活性、土壤酸碱度、土壤微生物数量的影响, 旨在揭示豌豆根际微生物区系和土壤酶活性的变化规律。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

化感物质香豆酸购于 Sigma 公司, 豌豆种子购于四川省农业科学院。

### 1.2 香豆酸处理液的配制

参照宋亮等人的方法<sup>[10]</sup>, 将香豆酸用蒸馏水溶于容量瓶

中配成  $10^{-2}$  mol/L 的母液, 然后将母液分别稀释成  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-7}$  mol/L。试验时现用现配制, 用蒸馏水作为对照。

### 1.3 试验设计

**1.3.1 种子萌发试验** 参照李春龙的方法<sup>[11]</sup>, 挑选粒大、饱满、大小一致的豌豆种子用蒸馏水清洗, 晾干后备用。先用 5.25 g/L 的 NaClO 溶液对受试的豌豆种子进行消毒, 时间为 15 min, 然后用蒸馏水清洗 4 次, 每次清洗 1 min; 将豌豆种子放置在直径为 9 cm 的皮氏培养皿中, 内垫 2 层滤纸, 每个培养皿内放豌豆种子 30 粒, 分别将  $10^{-7}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$  mol/L 的香豆酸处理液 15 mL 注入培养皿中, 对照为蒸馏水, 每个处理重复 3 次。然后将培养皿放置在恒温恒湿培养箱( $25 \pm 1$ ) °C, 黑暗中进行种子萌发试验。待豌豆种子萌芽 4 d 后记录其萌发的种子数, 计算豌豆种子的发芽率, 记录完测定所有萌发幼苗的根长和苗长, 并数出每个萌发幼苗的根数, 求其平均值。

**1.3.2 幼苗盆栽试验** 2014 年 5 月上旬取盆栽土(土壤取自成都农业科技职业学院校外实训基地内), 取回后先过 2 遍 2 cm 筛, 筛去较大的石块及粗枝等, 再过细筛, 用 45% 敌磺钠 350 g 进行土壤消毒处理, 然后将土混匀, 随机装盆。每盆土均装至花盆的三分之二处, 每盆装土 10 kg, 盆上口径 28 cm、深 25 cm, 播豌豆种子 10 粒。

待豌豆幼苗生长约 1 个月后, 挑选长势一致的豌豆壮苗进行处理。采用不同浓度的香豆酸( $10^{-7}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$  mol/L)溶液 40 mL 浇灌豌豆幼苗, 每个处理重复 4 次, 用等量的蒸馏水处理作为对照(即 0 mol/L)。此后每隔 10 d 浇 40 mL 香豆酸处理豌豆幼苗, 30 d 后即 2014 年 6 月 25 日取豌豆幼苗根际土, 用土钻钻取深度 20 cm、大约 300 g 豌豆幼苗根际土, 轻轻抖动后仍然粘贴在豌豆幼苗根系上的土壤用于根际微生物数量的测定, 装袋、封口并做好标签, 立即带回实验室进行分析处理, 参照韩春梅等人的方法<sup>[12]</sup>实施。

收稿日期: 2016–08–30

基金项目: 四川省重点专业(作物生产技术)建设项目(编号: 201411510101)。

作者简介: 李春龙(1976—), 男, 内蒙古通辽人, 硕士, 副教授, 高级农艺师, 主要从事农作物栽培新技术、特种经济作物栽培、设施农业等教学。E-mail: lch1976@126.com。

1.4 测定方法

1.4.1 豌豆种子萌发指标测定 豌豆幼苗根长、苗长用直尺测量。

1.4.2 土壤酶及土壤酸碱度测定 土壤酶活性测定均参照关松荫的方法<sup>[13]</sup>。土壤反硝化酶活性采用硝态氮剩余量法测定;纤维素酶活性采用硝基水杨酸比色法测定;脲酶、蛋白酶、酸性磷酸酶以及蔗糖酶活性均采用比色法测定;土壤酸碱度使用酸度计测定。

1.4.3 土壤微生物分析 土壤微生物采用平板涂抹法<sup>[14]</sup>测定,细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌采用马丁氏培养基,放线菌采用改良的高氏一号培养基。

1.5 数据处理

采用 SPSS 13.0 统计软件进行单因素方差、LSD 和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 外源化感物质香豆酸对豌豆种子萌发的影响

从表 1 可以看出,与对照比较,低浓度的香豆酸 10<sup>-7</sup> mol/L 促进了豌豆幼苗的 4 个形态指标,10<sup>-6</sup> mol/L 的香豆酸也促进了豌豆种子的萌发。随着香豆酸浓度的增加,豌豆幼苗的 4 个形态指标均不同程度受到抑制。10<sup>-5</sup> mol/L 香豆酸处理下的豌豆种子发芽率较对照显著下降,比对照降低 10.98%;豌豆幼苗的根长、苗长均在香豆酸浓度达到 10<sup>-4</sup> mol/L 时较对照显著受到抑制,分别较对照下降了 28.30%、26.47%;豌豆幼苗的根数则在香豆酸浓度达到

表 1 不同浓度香豆酸对豌豆种子萌发特性的影响

香豆酸浓度 (mol/L)	发芽率 (%)	根长 (cm)	苗长 (cm)	根数 (条)
CK	91.1±2.9a	5.3±0.3a	3.4±0.2a	13±0ab
10 <sup>-7</sup>	95.6±1.1a	5.7±0.6a	3.4±0.2a	14±1a
10 <sup>-6</sup>	92.2±1.1a	5.3±0.5a	2.9±0.2ab	11±0bc
10 <sup>-5</sup>	81.1±1.1b	4.9±0.3ab	2.7±0.3ab	10±1cd
10 <sup>-4</sup>	64.4±1.1c	3.8±0.2bc	2.5±0.2bc	8±1d
10 <sup>-3</sup>	51.1±4.0d	2.7±0.1cd	2.0±0.1c	5±1e
10 <sup>-2</sup>	26.7±3.8e	1.5±0.5d	0.7±0.1d	1±1f

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05),表 2 同。

10<sup>-5</sup> mol/L 时就显著受到抑制,较对照减少 23.08%。  
2.2 外源化感物质香豆酸对豌豆幼苗根际土壤酶活性及土壤酸碱度的影响

从表 2 可以看出,除了土壤酸性磷酸酶活性随着香豆酸浓度增加而呈递增的趋势外,其他 5 种土壤酶以及土壤 pH 值均有随着外源化感物质香豆酸浓度增加而呈递减的趋势。当香豆酸浓度为 10<sup>-7</sup> mol/L 时,土壤反硝化酶、蛋白酶较对照显著受到抑制,分别较对照降低了 20.49%、8.97%;土壤脲酶、蔗糖酶活性和土壤 pH 值在香豆酸浓度达到 10<sup>-6</sup> mol/L 时较对照显著受到抑制,分别较对照降低 33.33%、20.13%、3.59%;土壤纤维素酶活性在香豆酸浓度达到 10<sup>-5</sup> mol/L 时较对照显著受到抑制,较对照降低 24.53%;而土壤酸性磷酸酶活性在香豆酸浓度达到 10<sup>-6</sup> mol/L 时较对照显著提高,较对照提高 16.24%。

表 2 不同浓度香豆酸对豌豆幼苗根际土壤酶活性及土壤酸碱度的影响

香豆酸浓度 (mol/L)	酶活性(mg/g)						pH 值
	脲酶	反硝化酶	纤维素酶	蛋白酶	酸性磷酸酶	蔗糖酶	
CK	0.27±0.01a	2.88±0.05a	0.53±0.02a	0.78±0.02a	1.17±0.02e	4.47±0.09a	5.29±0.06a
10 <sup>-7</sup>	0.22±0.03ab	2.29±0.13b	0.50±0.02ab	0.71±0.04b	1.25±0.01de	4.07±0.18a	5.25±0.03a
10 <sup>-6</sup>	0.18±0.03bc	2.16±0.14bc	0.46±0.07ab	0.69±0.01b	1.36±0.02cd	3.57±0.10b	5.10±0.02b
10 <sup>-5</sup>	0.15±0.02cd	1.97±0.06cd	0.40±0.01b	0.67±0.01b	1.42±0.11bc	3.27±0.12bc	4.98±0.01c
10 <sup>-4</sup>	0.13±0.02cde	1.83±0.06de	0.39±0.05b	0.61±0.01c	1.47±0.01abc	3.01±0.06cd	4.91±0.02d
10 <sup>-3</sup>	0.11±0.02de	1.61±0.04e	0.27±0.04c	0.52±0.02d	1.55±0.00ab	2.75±0.31de	4.90±0.00d
10 <sup>-2</sup>	0.08±0.02e	1.32±0.05f	0.21±0.03c	0.47±0.01d	1.58±0.00a	2.35±0.11e	4.87±0.03d

注:表中数值为平均值±SD(n=3)。

2.3 外源化感物质香豆酸对豌豆幼苗根际土壤微生物的影响

从图 1 可以看出,不同浓度的香豆酸对豌豆幼苗根际土壤中的细菌、真菌、放线菌的数量均产生不同程度影响,并且随着香豆酸浓度的增加,豌豆幼苗根际土壤中细菌、真菌、放线菌数量均呈递减的趋势。与对照比较,香豆酸浓度在 10<sup>-6</sup> mol/L 时较对照显著降低豌豆幼苗根际土壤细菌(图 1-a)、放线菌(图 1-c)的数量,分别较对照降低 39.77%、31.86%。当香豆酸浓度达到 10<sup>-4</sup> mol/L 时,豌豆幼苗根际土壤内真菌数量较对照显著下降,较对照降低 71.15%(图 1-b)。

2.4 不同浓度香豆酸处理下豌豆幼苗根际土壤微生物数量及土壤酸碱度与土壤酶活性的相关关系

从表 3 可以看出,在不同浓度香豆酸处理下,豌豆幼苗根际土壤微生物数量均与土壤脲酶、反硝化酶、纤维素酶、蛋白酶、蔗糖酶活性以及土壤 pH 值呈极显著正相关,而与土壤酸

性磷酸酶活性呈极显著负相关。其中,蔗糖酶与土壤 pH 值的相关系数最大,为 0.910。

3 结论与讨论

外源化感物质香豆酸对豌豆种子萌发的影响。化感物质的作用影响植物生长的各个过程及不同的生理过程<sup>[15-17]</sup>,其中影响最直接的是种子萌发阶段和幼苗生长阶段。研究结果表明,香豆酸对豌豆种子萌发及幼苗生长的形态指标均表现出低浓度促进、高浓度抑制的效应,本结论与前人的研究结果<sup>[18]</sup>类似。

外源化感物质香豆酸对豌豆幼苗根际土壤酶活性及土壤酸碱度的影响。香豆酸浓度的增大,降低了土壤 pH 值,提高了土壤酸性磷酸酶的活性,而降低了土壤脲酶、反硝化酶、纤维素酶、蛋白酶和蔗糖酶的活性,本研究结论与前人的研究结果<sup>[19-20]</sup>相一致。土壤是复杂的生态系统,其中土壤酶和土壤

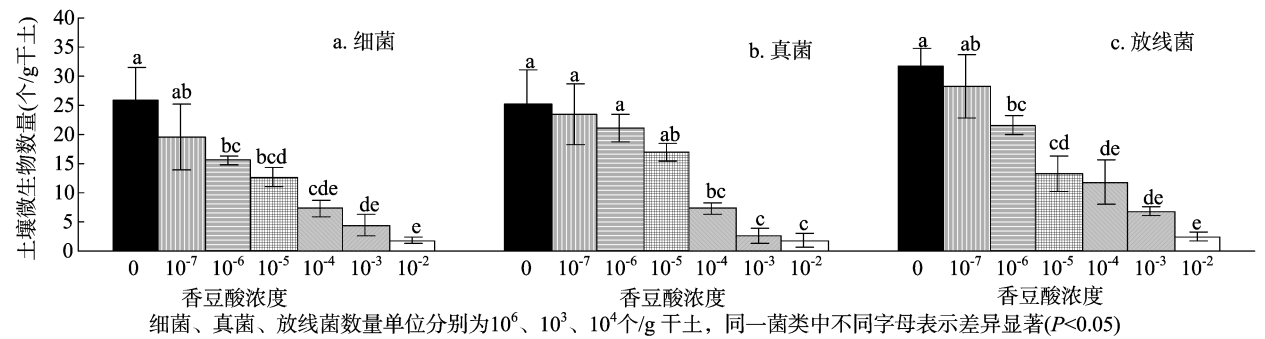


图1 不同香浓度豆酸对豌豆幼苗根际土壤微生物的影响

表3 土壤微生物数量以及土壤酸碱度与土壤酶活性的相关关系

项目	脲酶	反硝化酶	纤维素酶	蛋白酶	酸性磷酸酶	蔗糖酶	pH 值
细菌	0.679 **	0.833 **	0.789 **	0.785 **	-0.795 **	0.840 **	0.817 **
真菌	0.734 **	0.759 **	0.740 **	0.798 **	-0.809 **	0.793 **	0.860 **
放线菌	0.688 **	0.829 **	0.784 **	0.813 **	-0.836 **	0.877 **	0.891 **
pH 值	0.871 **	0.879 **	0.767 **	0.820 **	-0.876 **	0.910 **	

注：“\*\*”表示在 0.01 水平上显著。

微生物对土壤中的养分循环起着重要的推动作用,而土壤理化性质又影响着土壤酶活性和土壤微生物的生物活性<sup>[21]</sup>。因此,从土壤学入手来研究化感作用是可行的,可以将土壤酶学同其他相关学科紧密结合起来进行化感作用研究。

外源化感物质香豆酸对豌豆幼苗根际微生物的影响。随着香豆酸浓度的增加,其幼苗根际细菌、真菌和放线菌的数量均呈递减的趋势,较低浓度 10<sup>-6</sup> mol/L 的香豆酸就已经显著抑制土壤细菌和放线菌的数量。表明不同浓度的香豆酸引起了豌豆根际微生物区系组成的定向改变,破坏了其根际微生物的平衡,潜在影响着植物,以及植物和微生物的相互作用<sup>[12]</sup>。相关研究表明,化感物质阿魏酸、4-叔丁基苯甲酸及苯甲醛进入土壤后,对微生物区系变化产生影响,导致土壤微生物胞内酶与胞外酶比例失调或改变酶的构象,增强脲酶活性<sup>[22]</sup>;苜蓿根系分泌物皂苷对木霉具有抑制作用<sup>[23]</sup>;白菜根系分泌物糖甙硫氰酸酯对泡囊丛枝菌根(VAM)萌发产生显著的抑制作用<sup>[2]</sup>。

香豆酸处理下豌豆幼苗根际土壤微生物、土壤酸碱度与土壤酶的相关关系。土壤细菌、真菌、放线菌等是土壤关键生态过程中土壤酶活性的重要来源<sup>[24]</sup>,特定的土壤酶活性与细菌和真菌类群密切相关<sup>[25]</sup>。本研究结果表明,在不同浓度的香豆酸处理下,豌豆幼苗根际土壤微生物数量均与土壤酸性磷酸酶活性呈极显著负相关,而与其他 5 种土壤酶活性以及土壤 pH 值呈极显著正相关,表明外源化感物质香豆酸的处理影响豌豆的生长过程,改变土壤微生物区系,进而影响土壤酶活性,使得土壤环境条件向着不利于豌豆植株的生长方向演变。同时也证实了 Aon 等的理论,即特定的土壤酶活性与细菌、真菌等类群密切相关<sup>[25]</sup>。

参考文献:

[1] Chon S U, Choi S K, Jung S, et al. Effects of alfalfa leaf extracts and phenolic allelochemicals on early seedling growth and root morphology of alfalfa and barnyard grass[J]. Crop Protection, 2002, 21 (10): 1077 - 1082.

[2] 孔垂华,胡 飞. 植物化感(相生相克)作用及其应用[M]. 北京:中国农业出版社,2001:105.

[3] 何华勤,梁义元,贾小丽,等. 酚酸类物质的抑草效应分析[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2342 - 2346.

[4] 胡开辉,罗庆国,汪世华,等. 化感水稻根际微生物类群及酶活性变化[J]. 应用生态学报,2006,17(6):1060 - 1064.

[5] 张恩平,赵茹月,张淑红. 土壤添加物对外源化感物质处理下番茄生长的影响[J]. 现代农业科技,2015(6):78 - 79.

[6] 王振鸿. 豌豆的栽培技术[J]. 农村实用技术,2004(11):12 - 14.

[7] Saucke H, Ackermann K. Weed suppression in mixed cropped grain peas and false flax (*Camelina sativa*) [J]. Weed Research, 2006, 46 (6):453 - 461.

[8] 喻景权,松井佳久. 豌豆根系分泌物自毒作用的研究[J]. 园艺学报,1999,26(3):195 - 198.

[9] 高 旭,张古文,胡齐赞,等. 自毒物质肉桂酸对豌豆幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国蔬菜,2013(8):44 - 49.

[10] 宋 亮,潘开文,王进闯,等. 酚酸类物质对苜蓿种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报,2006,26(10):3393 - 3403.

[11] 李春龙. 水花生不同部位水浸液对豇豆种子萌发的影响[J]. 种子,2013,32(7):72 - 73.

[12] 韩春梅,李春龙,叶少平,等. 生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、生物群落结构及土壤养分的影响[J]. 生态学报,2012,32(2):489 - 498.

[13] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:中国农业出版社,1983:86 - 97.

[14] Visser S, Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: soil microorganisms [J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7(2):33 - 37.

[15] 朱 峰,何永福,叶照春. 大叶芥菜对眼子菜化感作用潜力的初步评价[J]. 杂草学报,2016,34(2):49 - 52.

[16] 林 娟,殷全玉,杨丙钊,等. 植物化感作用研究进展[J]. 中国农学通报,2007,23(1):68 - 72.

[17] 李 轩,卢海博,黄智鸿. 刺果瓜甲醇提取物对植物化感作用的研究[J]. 杂草学报,2016,34(4):23 - 27.

[18] 周宝利,李 燕,李 东,等. 化感物质松香酸对辣椒种子萌发、

卢金海,李博文,杨志新,等. 不同施肥处理对设施黄瓜生产系统重金属 Cd 积累的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(4):97-100.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.04.024

# 不同施肥处理对设施黄瓜生产系统 重金属 Cd 积累的影响

卢金海,李博文,杨志新,赵 洪

(河北农业大学资源与环境学院/河北省农田生态环境重点实验室,河北保定 071000)

**摘要:**以河北省永清县具代表性管理模式的黄瓜日光温室为对象,通过连续 2 年试验,研究不同施肥处理对设施黄瓜土壤重金属 Cd 累积的影响。结果表明,推荐氮肥施用量( $750 \text{ kg/hm}^2$ )、减氮施肥处理( $960 \text{ kg/hm}^2$ )的重金属 Cd 输入量明显低于常规施肥处理,鸡粪是设施黄瓜生产系统重金属 Cd 输入的主要来源;除不施用肥料外,其他施肥处理均出现不同程度的 Cd 净积累;推荐氮肥用量处理 Cd 的输出量相对最高,净积累量相对最低,产投比相对最高,可减轻土壤重金属的污染风险。

**关键词:**设施黄瓜;施肥量;Cd 净积累;产投比;输入量;输出量

**中图分类号:** S642.206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)04-0097-04

设施栽培作为一项提高蔬菜、花卉等作物产量的有效途径,近年来在我国迅猛发展,以日光温室和塑料大棚为主的设施栽培面积已超过  $100 \text{ 万 hm}^2$ <sup>[1-2]</sup>。河北省永清县作为全国优质设施栽培蔬菜基地,设施蔬菜种植面积达到  $21\,133 \text{ hm}^2$ ,其中设施黄瓜面积为  $4\,800 \text{ hm}^2$ 。由于设施环境的特殊性,温室土壤常出现酸化、次生盐渍化、微生物区系失调和残留的硝酸盐、亚硝酸盐、重金属超标等问题,其中重金属含量超标尤为突出<sup>[3]</sup>。因此,设施蔬菜生产系统的生态安全问题越来越受到关注。

蔬菜生产系统的重金属平衡决定着土壤中重金属的变化趋势及污染积累,进而对蔬菜生长发育产生不利影响。目前,大多学者集中在对土壤重金属的评价分析上,而对系统中重金属净积累研究尚少。Dach 等对比研究波兰、荷兰农业区的重金属平衡水平发现,高强度的种植模式会加大土壤生态系

统对重金属的积累,从而严重影响土壤环境及农业系统的生产安全性<sup>[4]</sup>;王丽英等对河北省设施蔬菜土壤微量金属元素调查与评价表明,该地区土壤出现不同程度的重金属污染和微量元素积累<sup>[5]</sup>。

施肥是影响土壤重金属含量的重要因素,有研究表明,大量施肥的菜地土壤中某些重金属含量显著高于种植粮食作物的农田土壤<sup>[6-7]</sup>。目前,有关设施蔬菜生产系统控制重金属积累的安全施肥研究尚未见报道。本研究以具有代表性管理模式的河北省永清县日光温室黄瓜为对象,通过连续 2 年的定位试验,以建立减少重金属积累的安全施肥方案,为降低土壤环境质量风险提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省廊坊市永清县永清镇北岔口村,  $116^{\circ}25'37'' \sim 116^{\circ}25'52''\text{E}$ ,  $39^{\circ}13'34'' \sim 39^{\circ}19'51''\text{N}$ ,为国家级无公害蔬菜生产基地,属北温带亚湿润气候区,大陆性季风气候,雨热同季,年平均日照  $2\,740 \text{ h}$ ,年平均降水  $540 \text{ mm}$ ,年平均气温  $11.5^{\circ}\text{C}$ 。试验选用种植 10 年黄瓜的廊坊 40 型日光温室大棚,土壤类型为潮褐土,质地为壤土,土壤有机质含量为  $2.70\%$ ,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为  $146.5$ 、 $400.2$ 、 $684.0 \text{ mg/kg}$ ,pH 值为  $7.5$  左右。黄瓜管理模式在当地具有

收稿日期:2016-02-28

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAD15B02);河北省教育厅项目(编号:ZH2012034,ZD20131013)。

作者简介:卢金海(1989—),男,河北涿州人,硕士研究生,主要从事设施蔬菜土壤重金属污染研究。E-mail:15933516179@163.com。  
通信作者:李博文,教授,博士生导师,主要从事土壤环境科学研究, E-mail:kjli@hebau.edu.cn;杨志新,博士,教授,主要从事生态、环境质量评价与监控研究, E-mail:yangzhixin@126.com。

幼苗生长及根际微生物的影响[J]. 华北农学报,2010,25(5): 155-160.

[19] 黄益宗,冯宗炜,张福珠. 化感物质对土壤硝化反应影响的研究[J]. 土壤与环境,1999,8(3):203-207.

[20] 林瑞余,于翠萍,戎 红,等. 苗期不同化感潜力水稻根际土壤酶活性分析[J]. 中国生态农业学报,2008,16(2):302-306.

[21] 王延平,王华田. 连作人工林化感效应研究综述[J]. 世界林业研究,2008,21(4):25-30.

[22] 袁光林,马瑞霞,刘秀芬,等. 化感物质对土壤脲酶的活性影响[J]. 环境科学,1998,19(2):55-57.

[23] Hoagland R E, Zablotowicz R M, Oleszek W A. Effects of alfalfa saponins on *in vitro* physiological activity of soil and rhizosphere bacteria[J]. Journal of Crop Protection,2001,4(2):349-361.

[24] Diamantidis G, Efosse A, Potier P, et al. Purification and characterization of the first bacterial laccase in the rhizospheric bacterium *Azospirillum lipoferum*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(7):919-927.

[25] Aon M A, Colaneri A C. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil [J]. Applied Soil Ecology,2001,18(3):255-270.