

## 氟磺胺草醚对不同豆科作物生长及根际固氮菌的影响

陈未, 李江叶, 刘丽珠, 童非, 戴群, 高岩

### 引用本文:

陈未, 李江叶, 刘丽珠, 等. 氟磺胺草醚对不同豆科作物生长及根际固氮菌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2076-2085.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0474>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### ZnO NPs对四种豆科种子发芽及幼苗生长的影响

彭晴晴, 杨静雅, 钟民正, 邢洋洋, 李紫燕, 毛晖, 周莉娜

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1174-1182 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1462>

### 绿肥作物对云南旱地土壤镉有效性的影响

王赞, 付利波, 梁海, 章子含, 杨伟, 何正海, 高嵩涓, 曹卫东

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2124-2133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0457>

### 畜禽粪污抗生素对土壤生物学效应的Meta分析

曾悦, 黄红英, 吴华山

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1043-1050 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1044>

### 太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践

闵炬, 孙海军, 陈贵, 姜振萃, 陆扣萍, 纪荣婷, 施卫明

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2418-2426 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1287>

### 3种磺胺类兽药单一及复合污染对不同作物根尖细胞的微核效应研究

金彩霞, 毛蕾, 司晓薇

农业环境科学学报. 2015(4): 666-671 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈未, 李江叶, 刘丽珠, 等. 氟磺胺草醚对不同豆科作物生长及根际固氮菌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2076–2085.

CHEN W, LI J Y, LIU L Z, et al. Effects of fomesafen on plant growth and nitrogen-fixing bacteria in the rhizosphere of different species of legumes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2076–2085.



开放科学 OSID

# 氟磺胺草醚对不同豆科作物生长及根际固氮菌的影响

陈未<sup>1</sup>, 李江叶<sup>1</sup>, 刘丽珠<sup>1</sup>, 童非<sup>1</sup>, 戴群<sup>2</sup>, 高岩<sup>1\*</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 江苏第二师范学院生命科学与化学化工学院, 南京 210013)



**摘要:** 为了研究豆田常用长残效除草剂氟磺胺草醚对不同季节豆科作物生长及根际固氮微生物的影响规律与机制, 选取春大豆、四季豆、夏大豆、绿豆、蚕豆及豌豆为材料, 于春、夏、秋季开展田间小区试验。通过对豆科作物地上部与根部性状的分析, 明确不同浓度氟磺胺草醚对豆科作物的药害规律, 采用荧光定量PCR技术分析固氮酶 *nifH* 基因丰度的变化, 明确氟磺胺草醚对豆科作物根际固氮细菌的影响, 并通过方差与相关性分析揭示不同豆科植物对氟磺胺草醚的响应模式差异。结果显示: 氟磺胺草醚对夏大豆生长及产量无显著影响; 1倍浓度 ( $225 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 氟磺胺草醚对春大豆、绿豆与豌豆不产生药害作用, 且能够使绿豆与豌豆增产3.5%~17.5%, 但2倍浓度 ( $450 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 会使这3种作物显著减产12.2%~19.6%; 氟磺胺草醚对四季豆和蚕豆的药害作用严重, 使作物产量显著下降23.0%~61.5%。豆科作物的产量与其根部性状显著相关, 高浓度氟磺胺草醚会使6种豆科作物根鲜质量、根瘤数量、根瘤鲜质量均呈显著降低趋势。氟磺胺草醚的施用使作物根际固氮细菌的丰度显著下降, 其变化趋势与豆科作物根部性状一致。研究建议氟磺胺草醚的施用量(有效成分用量)为: 春大豆、绿豆、豌豆控制在  $225 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 夏大豆可放宽至  $450 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 四季豆和蚕豆不适宜施用氟磺胺草醚。研究表明, 作物根际固氮细菌丰度的变化可能是导致结瘤能力改变的原因。

**关键词:** 氟磺胺草醚; 豆科作物; 根瘤; 固氮细菌

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)10-2076-10 doi:10.11654/jaes.2021-0474

## Effects of fomesafen on plant growth and nitrogen-fixing bacteria in the rhizosphere of different species of legumes

CHEN Wei<sup>1</sup>, LI Jiangye<sup>1</sup>, LIU Lizhu<sup>1</sup>, TONG Fei<sup>1</sup>, DAI Qun<sup>2</sup>, GAO Yan<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of

收稿日期: 2021-04-22 录用日期: 2021-06-09

作者简介: 陈未(1988—), 女, 江苏南京人, 博士, 助理研究员, 从事污染农田土壤修复相关研究。E-mail: wchen@jaas.ac.cn

\*通信作者: 高岩 E-mail: ygao@jaas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807140); 江苏省农业科学院院基金项目(027176111636)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41807140); Foundation of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences(027176111636)

Life Sciences and Chemical Engineering, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** Fomesafen is a long-lasting herbicide commonly used in legume fields. To investigate effects of fomesafen on the growth of legume crops and the nitrogen-fixing bacteria in the plant rhizosphere in different seasons, field experiments were carried out in spring, summer, and autumn. The legumes of spring soybean, kidney bean, summer soybean, mung bean, broad bean, and pea were selected. The characteristics of the roots and shoots of the legumes were analyzed. The patterns of phytotoxicity of different dosages of fomesafen were determined. The effects of fomesafen on root nitrogen-fixing bacteria were analyzed via fluorescent quantitative polymerase chain reaction (PCR) of the nitrogenase gene *nifH*. The response patterns of the six species of legumes to fomesafen were revealed through variance and correlation analysis. Fomesafen had no significant effect on the growth and yield of summer soybeans. The low concentration of fomesafen ( $225 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) did not harm spring soybeans, green beans and peas, while increasing the yields of mung beans and peas by 3.5% to 17.5%. However, the high concentration of fomesafen ( $450 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) significantly reduced the yield of the three crops by 12.2% to 19.6%. Fomesafen was seriously harmful to kidney beans and broad beans, reducing their yield by 23.0% to 61.5%. The recommended application of fomesafen in spring soybean, green bean, and pea fields was  $225 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ . However, the application of fomesafen in summer soybeans field could be raised to  $450 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Furthermore, fomesafen was not feasible for kidney beans and broad beans. The yields of legume crops were positively correlated to their root characteristics. At a high concentration, fomesafen significantly reduced the root weights, quantities, and fresh weights exhibited by the nodules of the six species of legume crops. Fomesafen significantly reduced the abundances of the *nifH* gene in the rhizosphere of the legume crops. The variations in the abundance of crop root nitrogen-fixing bacteria may be responsible for the changes in nodulation.

**Keywords:** fomesafen; legume; nodule; nitrogen-fixing bacteria

氟磺胺草醚(Fomesafen)是一种二苯醚类除草剂,因其效率高、选择性好而广泛应用于大豆、花生等豆科作物田间阔叶杂草的防治。氟磺胺草醚在不同类型土壤中的半衰期达45 d至12个月不等,即使在作物收获后,依然能够在土壤中保持活性<sup>[1-3]</sup>。自20世纪90年代以来,由于杂草抗性的增加,氟磺胺草醚的施用量逐渐增加,尤其在中国北方大豆产区,部分豆农用药量为登记用量的3~4倍,这导致了种植豆科作物的农田中药害残留问题日益严重<sup>[4-5]</sup>。

氟磺胺草醚的作用机理是通过抑制靶植物原卟啉原氧化酶的活性,造成植物体内过氧化物的积累,因此使植物细胞膜不饱和和脂肪酸氧化,进而导致产生膜渗透、色素被破坏、叶片快速脱水萎蔫。但原卟啉原氧化酶抑制剂对植物无专一性,具有广谱性的特点,因此在防除多种杂草的同时,对田间作物也会产生一定的影响<sup>[6-7]</sup>。有研究表明,田间施用氟磺胺草醚对绿豆、蚕豆等豆科作物的生长与产量存在显著影响,而随灌溉与降雨进入土壤中的氟磺胺草醚由于残效期长,还会对多种后茬作物(如玉米、高粱、轮作蔬菜等)的生长造成显著影响<sup>[8-9]</sup>。此外,土壤中残留的氟磺胺草醚会对土壤微生物群落产生显著的影响,使土壤中细菌与真菌数量显著下降,破坏土壤微生物群落结构,影响土壤功能<sup>[1,8,10]</sup>。

目前,关于除草剂施用对豆科作物生长影响的研究较多,主要针对氟磺胺草醚在杂草控制方面的功效及其对单一豆科作物地上部生物量与产量的影响,而

对于氟磺胺草醚影响豆科作物根系生长及根际固氮微生物相关规律的研究较少<sup>[11-15]</sup>。此外,氟磺胺草醚施用后对不同作物品种与季节的影响规律及特征的综合分析研究鲜见报道。明确氟磺胺草醚对作物生长及根际固氮微生物的影响,对阐明不同豆科作物对氟磺胺草醚的敏感程度与响应机制具有重要意义。细菌固氮酶由钼铁蛋白与铁蛋白组成,*nifH*是铁蛋白的编码基因,由于其序列保守性而被用作分子标记来研究固氮菌的丰度与分布<sup>[16]</sup>。本研究采用田间试验系统分析比较氟磺胺草醚对不同季节的6种豆科作物(春大豆、四季豆、夏大豆、绿豆、蚕豆、豌豆)生长及根际固氮菌的影响,阐明氟磺胺草醚对不同豆科作物的影响规律,并探讨氟磺胺草醚对不同豆科作物药害的可能机制,为豆科作物农田中除草剂的安全施用提供实践基础与理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选取江苏省本地豆科作物品种。春大豆:苏C1008;四季豆:苏菜豆3号;夏大豆:苏18;绿豆:苏绿2;蚕豆:苏蚕3号;豌豆:苏豌8号。

供试除草剂为氟磺胺草醚水剂,有效成分含量 $250 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,购自山东天润化工有限公司。

### 1.2 试验设计

田间试验于2019—2020年在江苏省农业科学院溧水植物科学基地( $119^{\circ}11' \text{ E}$ ,  $31^{\circ}36' \text{ N}$ )开展。供

试土壤为江苏省代表性黄棕壤。试验地共有18个大区(水泥池),每个大区长9 m、宽6 m,又分为4个小区,每个小区面积为3.5 m×2.5 m,设置裂区试验。共设置3个种植季节,每个季节2种豆科作物,春季种植春大豆和四季豆,夏季种植夏大豆和绿豆,冬季种植蚕豆和豌豆。由于杂草抗性的增加,农民采用化学除草的措施时普遍存在过量施用的情况,因此设置3种除草剂处理:人工除草(处理0)、田间常规施用量(225 g·hm<sup>-2</sup>,处理1)和2倍田间常规施用量(450 g·hm<sup>-2</sup>,处理2),每个处理4次重复。在田间杂草3叶期时施用氟磺胺草醚,将有效成分为250 g·L<sup>-1</sup>的氟磺胺草醚水剂加入清水中搅拌均匀(每20 g水剂加入16 L清水中),配制除草剂工作液,按照900 g·hm<sup>-2</sup>与1 800 g·hm<sup>-2</sup>的水剂施用量在小区内进行均匀喷洒,对杂草进行茎叶处理。每个季节共24(2×3×4)个小区,合6个大区,每2个大区选用同一种除草剂用量处理,每个季节同种除草剂处理的2种作物随机排列种植。

分别于2019年4月12日、7月2日、10月21日进行春、夏、秋3季作物的播种。播种前按照3.75 t·hm<sup>-2</sup>及600 kg·hm<sup>-2</sup>施用有机肥与无机复合肥作为基肥。豆科作物播种行距为58 cm,每小区种植7行,株距为40 cm,进行穴播,每穴播种2~3粒豆种,出苗后进行间苗,每行种植7株。待豆科作物2~3片复叶期,进行除草剂处理,田间试验期间进行喷灌、除虫等田间管理。

### 1.3 样品采集及植物性状测定

分别于2019年6月24日、7月12日、9月3日、9月18日和2020年4月21日、5月3日进行四季豆、春大豆、夏大豆、绿豆、蚕豆及豌豆的采收与测产工作。分别测定豆科作物的株高、单株荚数、豆荚鲜质量、小区株数并计算小区产量。由于豆科植物盛花期是根瘤固氮活性最强的时期,因此,在每种豆科作物盛花期采集植物根样品,测定根鲜质量、根瘤数量与根瘤鲜质量。采样方法为:每个小区选取4株长势相同的植物样品,挖取植株根周10 cm左右,每个处理共16株植物样品。

采用抖根法采集盛花期植物根际土壤:采集植物根并抖落根系周围土块,采用无菌水洗涤植物根系,离心收集植物根周2~3 mm区域土壤,同时于不同季节采集田间未种植植物的土体土壤作为对照处理<sup>[17]</sup>。每个小区随机采集4株植物根系,收集根际土壤后合并为一个样品,每个处理共4个根际土壤样品,每季共24个根际土壤样品(2种豆科作物,每种作物3个

除草剂处理,4个重复)、4个土体土壤样品,3季试验共采集84个土壤样品。

### 1.4 荧光定量PCR

采用FastDNA<sup>®</sup> Spin Kit for Soil(MP Bio, USA)试剂盒提取土壤总DNA。称取0.5 g土样,按照说明书的提取步骤进行。核酸质量和纯度以及DNA的完整性分别采用Nanodrop<sup>®</sup>ND-1000紫外分光光度计(NanoDrop Technologies, Wilmington, DE)及0.8%的琼脂糖凝胶电泳检测。

荧光定量PCR采用ABI 7500实时荧光定量PCR仪(Applied Biosystems, Thermo Fisher Scientific, USA)进行分析。选用*nifH*基因通用引物<sup>[16]</sup>:*polF*(5'-TGC-GAYCCSAARGCBGACTC-3')、*polR*(5'-ATSGCCAT-CATYTCRCCGGA-3')对根际土壤*nifH*基因进行扩增,采用SYBR green probe(2×SYBR Premix EX Taq<sup>™</sup> II, Takara)进行反应,体系为:10 μL 2×SYBR Premix, 1.0 μL 10 μmol·L<sup>-1</sup>上游引物, 1.0 μL 10 μmol·L<sup>-1</sup>下游引物, 1.0 μL DNA模板, 无菌超纯水补足20 μL。反应循环参数:95℃预变性90 s, 1个循环;95℃30 s, 55℃30 s, 72℃30 s, 40个循环;72℃总延伸10 min。试验设置3个重复。标准曲线构建方法如下:对土壤DNA中的*nifH*基因进行PCR扩增,将PCR产物连接到pEASY-T3克隆载体上,转化到宿主大肠杆菌中,于氨苄青霉素平板上筛选重组子,以M13引物扩增并验证重组子*nifH*基因序列。PCR反应的条件:95℃预变性90 s, 1个循环;95℃30 s, 55℃30 s, 72℃30 s, 35个循环;72℃总延伸10 min。对验证后的单菌落进行扩大培养并提取质粒,用Nanodrop<sup>®</sup>ND-1000测定质粒浓度,并换算成拷贝数。通过梯度稀释获得质粒的标准曲线。梯度稀释质粒和待测样品同时进行荧光定量PCR扩增,方法同上。

### 1.5 统计分析

数据采用SPSS Statistics 23进行统计分析。处理间差异显著性采用单因素ANOVA分析,Duncan检验;采用一般线性模型进行氟磺胺草醚对不同季节大豆影响的方差分析,根据方差齐性,分别采用LSD与Tamhane's T2检验;采用Pearson相关系数表征豆科植物产量、地上部及根部性状的相关性,通过双尾检验确定其显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 对不同季节豆科作物生长与产量的影响

氟磺胺草醚对不同季节豆科作物株高、单株荚

数、豆荚鲜质量及产量的影响存在一定差异。由表1可知,不同季节豆科作物的株高受氟磺胺草醚影响较小,氟磺胺草醚的施用对春大豆、四季豆、夏大豆的株高没有显著影响;2倍施用浓度使绿豆的株高显著下降11.6%;施用氟磺胺草醚使蚕豆株高显著下降11.3%~12.1%,1倍与2倍浓度间无显著差异;而氟磺胺草醚对豌豆株高的影响与其他豆科作物相反,除草剂的施用能够使豌豆株高增加6.0%~8.3%。不同季节豆科作物的单株荚数受氟磺胺草醚影响也存在显著差异,氟磺胺草醚对春大豆与豌豆的单株荚数没有显著影响;1倍浓度的氟磺胺草醚使夏大豆单株荚数显著增加32.3%,使蚕豆单株荚数显著增加16.3%;2倍浓度的氟磺胺草醚分别使四季豆、绿豆、蚕豆单株荚数显著降低24.1%、23.1%、21.4%。氟磺胺草醚对夏大豆豆荚鲜质量的影响不显著;1倍浓度氟磺胺草醚能够提高春大豆豆荚鲜质量,但影响未达显著水平,2倍浓度氟磺胺草醚的施用使豆荚鲜质量显著降低12.2%;不同浓度氟磺胺草醚对四季豆与蚕豆的影响趋势相同,1倍浓度氟磺胺草醚可分别使这两种作物豆荚鲜质量显著降低61.5%、23.0%,2倍浓度氟磺胺草醚可进一步使两者的豆荚鲜质量分别显著降低

35.5%、29.0%;绿豆与豌豆的豆荚鲜质量对氟磺胺草醚的响应模式相同,即1倍浓度氟磺胺草醚可分别使两者豆荚鲜质量增加17.5%、17.4%,而2倍浓度氟磺胺草醚会使其显著降低19.6%、18.4%。豆荚鲜质量与理论产量受氟磺胺草醚的影响模式相似。

由此可知,夏大豆对氟磺胺草醚不敏感,施用不同浓度氟磺胺草醚对夏大豆的株高、豆荚鲜质量及理论产量均无显著影响;春大豆对1倍浓度氟磺胺草醚不敏感,但2倍浓度会使其减产;氟磺胺草醚对四季豆与蚕豆产量的影响趋势相同,1倍浓度氟磺胺草醚即可使这两种豆科作物显著减产,2倍浓度氟磺胺草醚会进一步显著降低其产量;1倍浓度氟磺胺草醚会促进绿豆与豌豆生长,并显著提高产量,而2倍浓度的氟磺胺草醚会使其产量显著降低,且低于人工除草处理。综上,不同豆科作物对不同浓度的氟磺胺草醚的响应存在显著差异,敏感程度为四季豆 $\approx$ 蚕豆 $>$ 绿豆 $\approx$ 豌豆 $>$ 春大豆 $>$ 夏大豆。

## 2.2 对不同季节豆科作物根与根瘤的影响

氟磺胺草醚对豆科作物根部也会产生显著影响,如图1所示,不同季节豆科作物的响应模式存在显著差异。氟磺胺草醚的施用对春大豆、蚕豆的根鲜质

表1 氟磺胺草醚对春、夏、秋季豆科作物生长与产量的影响

Table 1 Effects of fomesafen on the plant growth and yield of the legumes in different seasons

季节 Season	作物品种 Legume specy	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	单株荚数 Pods number per plant/个	豆荚鲜质量 Fresh weight of pods per plant/g	理论产量 Theoretical yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
春季 Spring	春大豆	处理0	47.84±2.14a	32.50±3.48a	73.38±13.00a	1 509±267a	
		处理1	41.52±7.39a	37.25±2.42a	76.07±10.36a	1 564±213a	
		处理2	39.19±2.16a	30.56±7.20a	64.43±2.17b	1 346±45b	
	四季豆	处理0	240.26±9.76a	28.06±2.14a	195.82±13.92a	11 189±795a	
		处理1	222.60±7.19a	25.19±1.67ab	75.18±4.24b	4 295±242b	
		处理2	221.66±9.36a	21.31±6.32b	48.47±4.11c	2 769±234c	
夏季 Summer	夏大豆	处理0	92.60±3.00a	105.75±8.61b	133.33±12.78a	2 743±262a	
		处理1	99.35±4.49a	139.92±9.80a	159.87±11.03a	3 289±226a	
		处理2	93.88±2.10a	117.08±4.66ab	126.11±10.21a	2 594±210a	
	绿豆	处理0	81.17±1.28a	12.58±0.51a	177.98±7.66b	1 627±70b	
		处理1	81.17±4.45a	11.58±2.02a	208.95±5.47a	1 910±50a	
		处理2	71.75±2.39b	9.67±0.51b	143.05±4.91c	1 308±45c	
	秋季 Autumn	蚕豆	处理0	141.06±4.43a	39.19±4.43b	282.19±5.05a	2 580±185a
			处理1	124.00±1.48b	45.56±1.34a	217.06±8.21b	1 985±75b
			处理2	125.06±4.40b	30.81±1.58c	154.31±3.21c	1 411±117c
豌豆		处理0	160.19±2.72b	89.94±2.14a	84.64±1.39 b	2 418±159b	
		处理1	169.81±2.74a	90.69±2.53a	99.33±1.30a	2 838±148a	
		处理2	173.44±4.23a	94.00±1.71a	69.06±3.47c	1 973±99c	

注:同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  level.

量、根瘤数量及鲜质量产生显著影响:1倍浓度氟磺胺草醚可使这两种豆科作物根鲜质量分别降低23.7% ( $P<0.05$ )和19.7% ( $P<0.05$ ),根瘤数量分别降低43.0% ( $P<0.01$ )和36.7% ( $P<0.01$ ),根瘤鲜质量也显著降低12.9%和38.1%不等;2倍浓度的氟磺胺草醚会使春大豆、蚕豆的根鲜质量、根瘤数量与鲜质量进一步降低,降幅达28.2%~57.3%。对于夏大豆及四季豆,1倍浓度氟磺胺草醚的施用对其根鲜质量的影响不显著,2倍浓度除草剂的施用使根鲜质量分别降低38.0% ( $P<0.05$ )、20.2% ( $P<0.05$ ),而根瘤数量及鲜质量受不同浓度氟磺胺草醚的影响显著,1倍与2倍

施用浓度的氟磺胺草醚均可使夏大豆及四季豆的根瘤数量及鲜质量显著下降 ( $P<0.05$ ),且随施用浓度增加,影响加剧(2倍浓度下差异均达  $P<0.01$  显著水平)。绿豆与豌豆的根部性状受氟磺胺草醚影响趋势相似,1倍浓度氟磺胺草醚对根鲜质量影响不显著,但会显著增加根瘤数量与根瘤鲜质量,根瘤数量增幅分别为22.0% ( $P<0.05$ )和36.6% ( $P<0.05$ ),根瘤鲜质量分别增加10.6% ( $P<0.05$ )和6.3% ( $P>0.05$ );而2倍浓度氟磺胺草醚会显著降低这两种作物的根鲜质量(46.4%、14.7%,  $P<0.05$ ),极显著降低根瘤数量与鲜质量,降幅达52.1%~64.4% ( $P<0.01$ )。

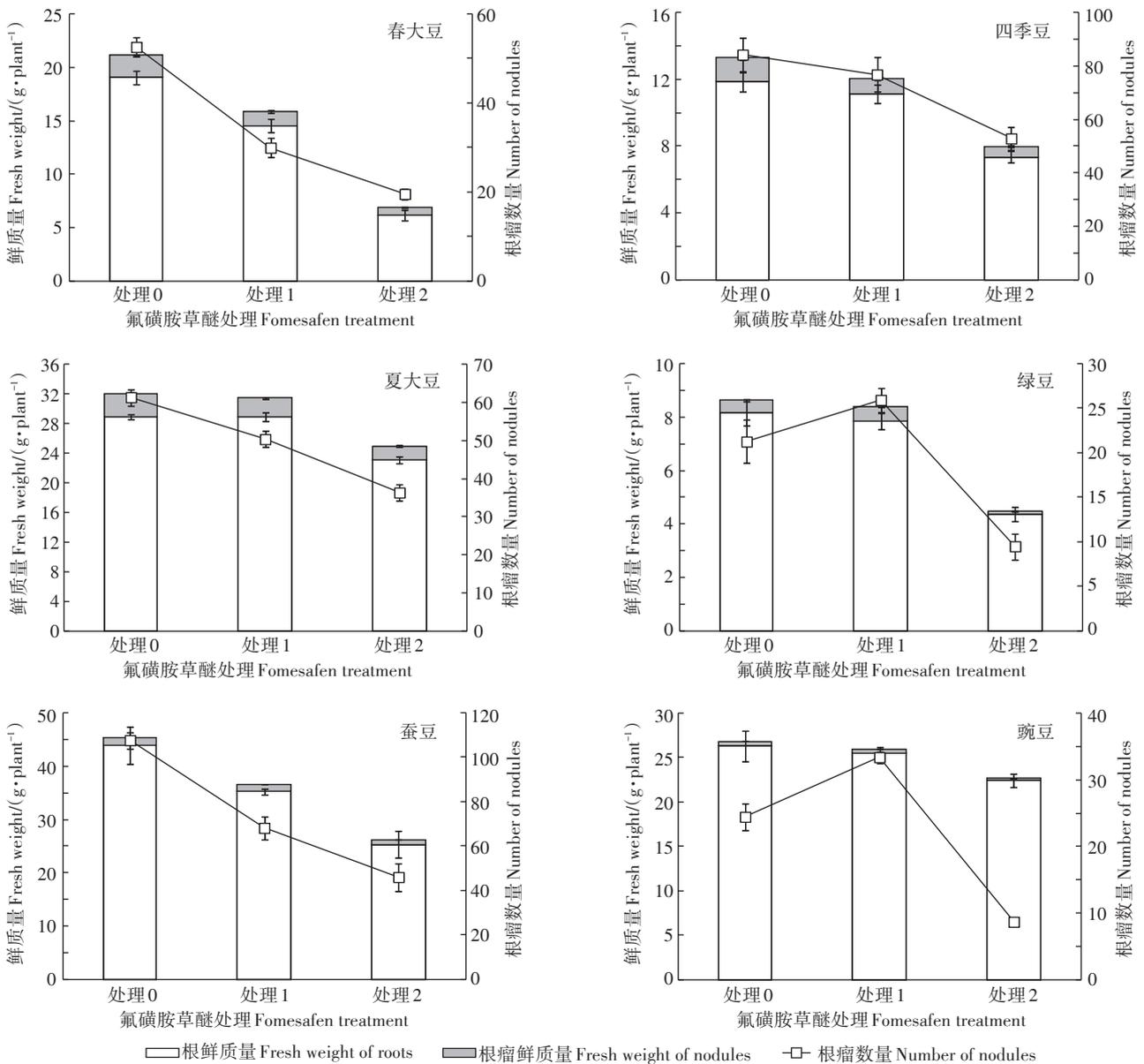


图1 氟磺胺草醚对春、夏、秋季豆科作物根鲜质量、根瘤数量及根瘤鲜质量的影响

Figure 1 Effects of fomesafen on the fresh weight of roots, the number of nodules, and the fresh weight of nodules of different legumes

基于以上结果可知,不同浓度氟磺胺草醚对豆科作物根部的影响尤其是植物根瘤的数量与鲜质量较为显著,2倍浓度除草剂的施用会使植物根瘤数量大幅度下降,最高降幅达64.4%。1倍浓度氟磺胺草醚对6种不同季节豆科作物的影响程度为春大豆>蚕豆>四季豆>夏大豆>豌豆>绿豆,而2倍浓度氟磺胺草醚会使6种豆科作物根鲜质量、根瘤数量、根瘤鲜质量均呈显著降低趋势。

### 2.3 对不同季节豆科作物根际土壤 *nifH* 基因丰度的影响

由于根瘤是土壤中根瘤菌入侵植物根部形成的固氮共生体,根瘤的大幅减少可能是由于土壤中的固氮根瘤菌对氟磺胺草醚敏感,因此,我们进一步分析

了根际土壤中固氮基因(*nifH*)的丰度变化,以此研究豆科作物根际固氮细菌的变化趋势。如图2所示,氟磺胺草醚对不同季节豆科作物根际土壤(以干土计)中 *nifH* 基因丰度的影响也存在一定差异。首先,6种豆科作物不施用氟磺胺草醚处理的根际 *nifH* 基因丰度均显著高于非根际土壤( $P<0.01$ )。其次,每克干土中四季豆根际 *nifH* 基因丰度最高,达  $2.37\times 10^8$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ ;夏大豆、绿豆、豌豆根际 *nifH* 基因的丰度均处于  $10^7$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$  数量级;而春大豆、蚕豆根际 *nifH* 基因丰度较低,春大豆根际土壤 *nifH* 基因丰度为  $3.6\times 10^6\sim 8.0\times 10^6$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ ,蚕豆未施用除草剂的根际土壤 *nifH* 基因丰度约为  $1.06\times 10^7$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ ,施用氟磺胺草醚后,丰度下降至  $2.8\times 10^6\sim 4.7\times 10^6$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ 。

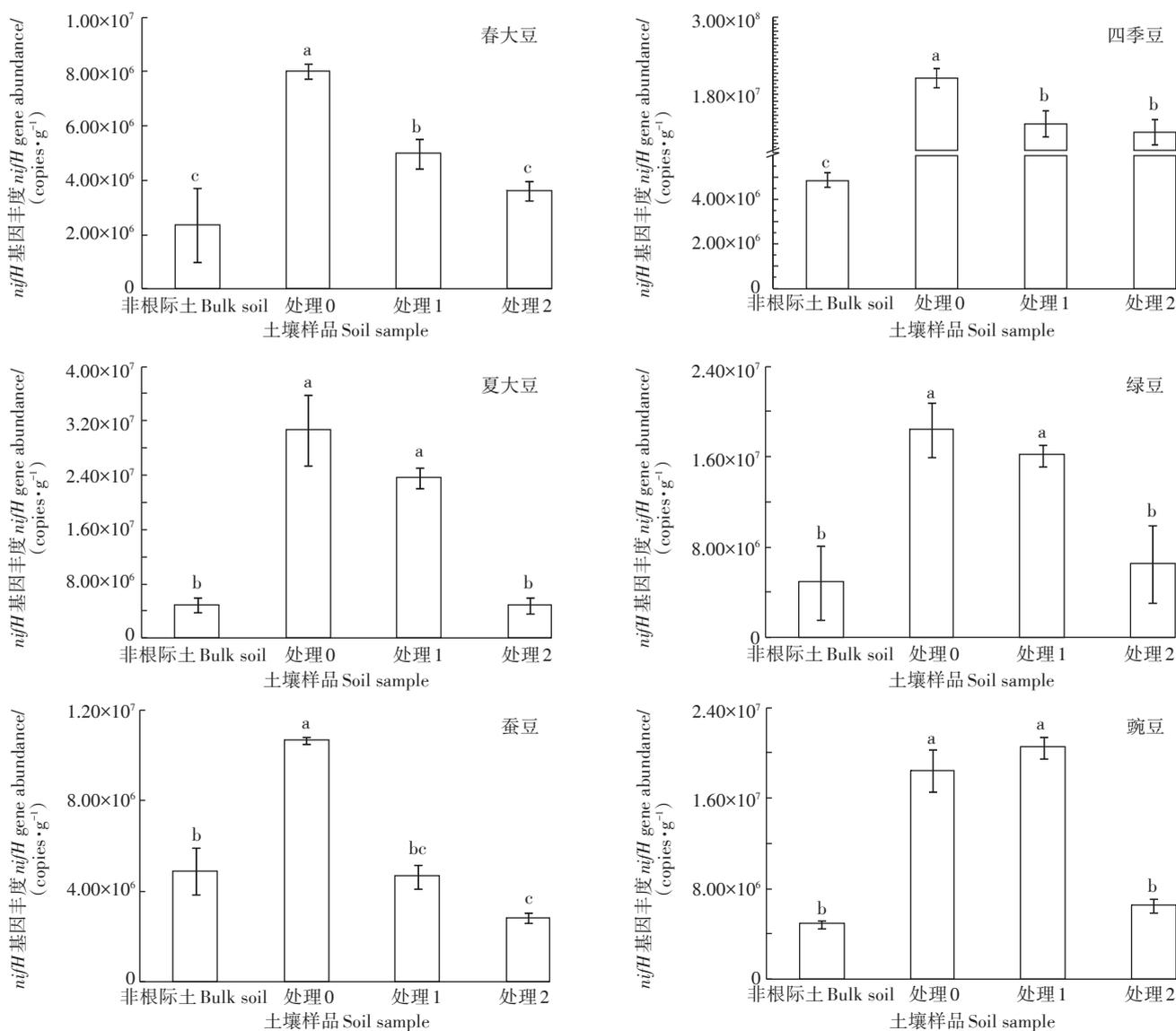


图2 氟磺胺草醚对根际土壤 *nifH* 基因丰度的影响

Figure 2 Effects of fomesafen on the abundances of *nifH* gene in the rhizosphere

不同浓度氟磺胺草醚对豆科作物的影响趋势也存在一定差异,施用1倍浓度氟磺胺草醚会使春大豆、四季豆及蚕豆根际 *nifH* 基因丰度显著下降,其中蚕豆根际 *nifH* 基因丰度下降至与非根际土同一水平 ( $P>0.05$ ),而豌豆根际的 *nifH* 基因丰度出现小幅增加,但并未达显著水平。2倍浓度氟磺胺草醚使春大豆、夏大豆、绿豆、豌豆根际 *nifH* 基因降低至与非根际土同一水平,而蚕豆根际 *nifH* 基因丰度在2倍氟磺胺草醚作用下显著低于非根际土壤。由此可见,春大豆、四季豆及蚕豆根际固氮细菌对氟磺胺草醚较敏感,1倍浓度氟磺胺草醚即可使 *nifH* 基因丰度显著下降;夏大豆、绿豆与豌豆根际固氮细菌对1倍浓度氟磺胺草醚不敏感,1倍浓度氟磺胺草醚使豌豆根际 *nifH* 基因丰度小幅上升,但未达显著水平,而2倍浓度氟磺胺草醚会使这3种作物根际土壤中 *nifH* 基因丰度显著下降。

#### 2.4 对不同季节大豆地上部与根部性状的影响规律

氟磺胺草醚是大豆田间最为常用的除草剂,为了研究氟磺胺草醚对不同季节种植的大豆产生的影响,采用一般线性模型对大豆性状进行方差分析,结果如表2所示。除草剂氟磺胺草醚的施用水平,对大豆豆荚鲜质量、单株荚数、根鲜质量、根瘤数量及根瘤鲜质量均产生极显著的影响 ( $P<0.01$ ),而对大豆株高的影响不显著;而季节因素对大豆的不同性状指标均产生显著影响,其中对根瘤鲜质量的影响达显著水平 ( $P<0.05$ ),而对其他性状的影响均达极显著水平 ( $P<0.01$ );除草剂施用与季节交互作用对大豆根鲜质量与根瘤数量产生极显著影响 ( $P<0.01$ ),对株高与单株荚数的影响达显著水平 ( $P<0.05$ ),而对豆荚鲜质量与根瘤鲜质量并无显著影响。

结合表1所示,不同季节的大豆在农艺性状方面存在显著差异,夏大豆地上部与根部生物量显著

高于春大豆,产量也显著增加。氟磺胺草醚对春、夏大豆地上部性状的影响存在一定差异:施用1倍浓度氟磺胺草醚对春、夏大豆地上部生物量与产量影响较小,除夏大豆的单株荚数显著增加外,其他性状均无显著变化;而施用2倍浓度氟磺胺草醚会使春大豆豆荚鲜质量及产量出现显著下降,而夏大豆的豆荚鲜质量及产量虽有所下降,但未达显著水平。对于根部,氟磺胺草醚对春大豆根部的影响较为显著,且随施用浓度增加影响加剧;而1倍浓度氟磺胺草醚对夏大豆根部生长及根瘤鲜质量的影响不显著,但根瘤数量显著下降,2倍浓度氟磺胺草醚使夏大豆根鲜质量及根瘤鲜质量显著降低,根瘤数量也进一步减少。据此,氟磺胺草醚对春大豆地上部及根部的影响均强于夏大豆。

### 3 讨论

#### 3.1 氟磺胺草醚对不同豆科作物的抑制作用及其施用量的选择

氟磺胺草醚是一类二苯醚类选择性除草剂,其作用机理是通过抑制靶标植物原卟啉原氧化酶(PPO)活性达到抑制杂草生长的目的。PPO催化原卟啉原IX氧化成原卟啉IX的反应是亚铁血红素和叶绿素生物合成的最后一步,PPO抑制剂阻断该反应的发生,致使原卟啉IX积累。原卟啉IX对光敏感,在光下易形成单线态氧或其他过氧化物,因此导致细胞膜不饱和脂肪酸氧化,进而使植物细胞膜渗透、色素被破坏,植物叶片快速脱水萎蔫,从而达到防治田间杂草的效果<sup>[6,18]</sup>。

前期已有一些研究分析了氟磺胺草醚对大豆田间杂草的防治效果及其对大豆生长的影响,结果表明,氟磺胺草醚对大豆田间阔叶杂草有较好的防治效果,且在一定剂量内,对大豆生长与产量无显著影响,

表2 氟磺胺草醚对不同季节大豆影响的方差分析(F值)

Table 2 Analysis of factors on soybeans of different seasons by fomesafen using general linear model (F value)

	除草剂 Herbicide	季节 Season	除草剂×季节 Herbicide×Season
豆荚鲜质量 Fresh weight of pods per plant	9.122**	110.110**	1.834
株高 Plant height	1.697	728.048**	4.107*
单株荚数 Pots numbers per plant	8.984**	500.178**	4.728*
根鲜质量 Fresh weight of roots	189.400**	10.228**	25.123**
根瘤数量 Number of nodules	135.999**	10.570**	5.673**
根瘤鲜质量 Fresh weight of nodules	115.751**	4.385*	0.844

注:\*\*表示极显著差异 ( $P<0.01$ ), \*表示显著差异 ( $P<0.05$ )。下同。

Note:\*\* indicates the significant differences at  $P<0.01$  level, and \* indicates the significant differences at  $P<0.05$  level. The same below.

是一种对大豆较为安全的高效除草剂<sup>[11]</sup>。朱海荣等<sup>[19]</sup>对大豆田间除草剂种类及用量效果进行研究,结果表明,低浓度混合制剂5%精喹禾灵乳油 $1\ 200\ \text{mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ +25%氟磺胺草醚水剂 $1\ 875\ \text{mL}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的除草效果最好且对大豆影响最小,加大剂量后对大豆药害明显。薛仁凤等<sup>[20]</sup>选取不同除草剂组合研究其对绿豆田间杂草防效,发现氟磺胺草醚分别与氟吡甲禾灵、拿扑净及精喹禾灵的组合对杂草防效较好,且对绿豆存在一定的增产效果;而SOLTANI等<sup>[21]</sup>的研究发现,氟磺胺草醚对绿豆生长产生显著抑制作用,不利于绿豆的安全生产。此外,有研究者分析了不同除草剂对蚕豆田间杂草及蚕豆生长的影响,结果表明氟磺胺草醚单施或与精喹禾灵等除草剂复施均能使杂草显著减少,且草害级别显著降低,但会对蚕豆产生药害,使其显著减产<sup>[22-23]</sup>。25%氟磺胺草醚水剂茎叶处理对红小豆有轻微药害,但后期可恢复生长,且产量大幅度提高<sup>[24-25]</sup>。而本研究共探讨了氟磺胺草醚对春大豆、四季豆、夏大豆、绿豆、蚕豆及豌豆这6种不同豆科作物的影响,结果表明,氟磺胺草醚对夏大豆影响较小,在 $450\ \text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 剂量内对作物生长及产量无显著影响,该研究结果与孔祥清等<sup>[11]</sup>和朱海荣等<sup>[19]</sup>一致;但氟磺胺草醚对春大豆的抑制作用强于夏大豆,1倍浓度氟磺胺草醚( $225\ \text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ )对春大豆不产生药害作用,但2倍浓度会使春大豆显著减产;与此同时,研究结果表明1倍浓度氟磺胺草醚对绿豆与豌豆不产生药害,且能够使其增产,但2倍浓度会使这两种作物产量显著降低,因此推荐施用剂量应控制在 $225\ \text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;此外,研究发现氟磺胺草醚对四季豆和蚕豆的药害严重,使其产量显著下降,因此不适宜施用于这两种豆科作物农田。

### 3.2 氟磺胺草醚对豆科植物影响的可能机制

由研究结果可知,氟磺胺草醚对不同季节豆科作物生长与产量的影响为四季豆 $\approx$ 蚕豆 $>$ 绿豆 $\approx$ 豌豆 $>$ 春

大豆 $>$ 夏大豆,而对豆科作物根与根瘤的影响为春大豆 $\approx$ 蚕豆 $>$ 四季豆 $\approx$ 夏大豆 $>$ 豌豆 $\approx$ 绿豆。氟磺胺草醚对豆科作物地上部与根部的影响的不一致性可能是由于该除草剂对植物地上部与根部的作用机理不同。氟磺胺草醚通过抑制植物原卟啉原氧化酶的活性,阻断了亚铁血红素与叶绿素的生物合成,导致植物细胞膜不饱和脂肪酸氧化,影响作物地上部的生长<sup>[6,18]</sup>。而对于根部的作用可能存在两方面:(1)氟磺胺草醚作用于地上部影响作物生长,从而影响植物根部对水分及营养的吸收,抑制根生长;(2)氟磺胺草醚通过影响豆科作物根际微生物,尤其是固氮微生物的丰度,使根瘤数量下降,导致固氮作用减弱,共生体为植物生长提供的有效氮素降低,影响植物根系的生长<sup>[1,9]</sup>。

因此,为了研究不同豆科作物对两种浓度的氟磺胺草醚的响应规律与可能的机制,采用皮尔逊相关系数研究豆科作物地上部、根部性状与除草剂施用浓度及产量之间的相关性,结果如表3所示。豆科作物产量、根鲜质量与除草剂施用浓度呈极显著负相关( $P<0.01$ ),根瘤数量、根瘤鲜质量与除草剂施用浓度呈显著负相关( $P<0.05$ ),即随着氟磺胺草醚施用量的增加,作物产量、根鲜质量、根瘤数量与根瘤鲜质量呈下降趋势。作物产量与根鲜质量、根瘤数量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与根瘤鲜质量呈显著正相关( $P<0.05$ ),该结果表明,豆科作物产量与根部性状存在显著联系。

根系是植物从土壤中吸收水分和养分的器官,作物产量在很大程度上取决于根系发育状况<sup>[26]</sup>。有研究表明,大豆盛花期根系硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性增加,从而能够提高根系对氮素同化利用的效率,使大豆增产<sup>[27]</sup>。此外,植物根际微生物组是植物功能发挥不可或缺的组成部分,大量研究表明,植物根际微生物组及菌群互作关系在促进植物生长、适应逆境、维持植物健康以及帮助植物高

表3 豆科植物产量、地上部及根部性状与除草剂施用浓度的相关性

Table 3 Correlations of the fomesafen treatments, yields, the characters of shoots and roots of the legumes

	除草剂 施用浓度 Fomesafen dosage	产量 Yield	株高 Plant height	单株荚数 Pods number per plant	根鲜质量 Fresh weight of roots	根瘤数量 Number of nodules	根瘤鲜质量 Fresh weight of nodules
产量Yield	-0.370**						
株高Plant height	-0.041	0.039					
单株荚数Pods number per plant	-0.013	-0.037	0.018				
根鲜质量Fresh weight of roots	-0.315**	0.425**	0.144*	0.192**			
根瘤数量Number of nodules	-0.104*	0.287**	0.448**	-0.299**	0.319**		
根瘤鲜质量Fresh weight of nodules	-0.115*	0.132*	-0.088	0.039	-0.248**	0.475**	

效获取养分方面具有关键作用<sup>[28]</sup>。在植物根际环境中,植物将光合产物输送到地下,一部分用于支撑根系生长及其生理活动,另一部分以根分泌物的形式释放到根际环境中,极大地改变了根际土壤的物理、化学和生物学性质,招募和供养微生物,使根际成为植物-微生物、微生物-微生物互作最活跃的热点区域,成倍提升植物对土壤养分的活化与利用效率,从而促进植物的生长并有效增加产量<sup>[28-29]</sup>。

氟磺胺草醚是一种长残效的除草剂,随着杂草抗药性的产生,豆农通过增加施用量的方法防治杂草,因此氟磺胺草醚残留问题日益严重。土壤中残留的氟磺胺草醚不仅会对作物的生长造成严重影响,还会破坏土壤微生物群落结构,影响土壤功能。周世雄等<sup>[9]</sup>的研究发现,氟磺胺草醚施用会使大豆根际细菌数量降低,同时对根际土壤磷酸酶、脲酶及蔗糖酶活性产生一定影响;WU等<sup>[11]</sup>发现氟磺胺草醚会降低土壤细菌与真菌数量,但却显著提高土壤微生物对碳源的利用能力,并提高土壤微生物的功能多样性,同时发现氟磺胺草醚对土壤微生物的影响具有持续性。根瘤菌是一种重要的根际微生物,能够通过入侵豆科植物根而形成根瘤类菌体,其在固氮酶的作用下可以将空气中的 $N_2$ 转化为 $NH_3$ 并吸收利用,进而完成蛋白质合成,豆科植物根瘤的共生固氮作用是植物生长重要的氮素来源<sup>[30]</sup>。而土壤中残留的氟磺胺草醚不仅会减少土壤中固氮微生物的数量,同时会抑制根瘤中固氮酶的活性<sup>[1,31]</sup>。本研究发现,氟磺胺草醚的施用会显著影响豆科作物根瘤数量与鲜质量。对豆科植物根际固氮酶 $nifH$ 基因的丰度变化的研究发现,根际固氮细菌丰度受氟磺胺草醚影响显著,这可能是导致根瘤数量及鲜质量显著下降的主要原因。根瘤数量与鲜质量的下降造成固氮作用减弱,共生体为植物生长提供的有效氮素显著降低,从而影响植物根系及地上部的生长。而对于绿豆和豌豆,在1倍浓度氟磺胺草醚处理后,根际 $nifH$ 基因丰度未出现下降,豌豆根际 $nifH$ 基因还出现小幅增加,可能是由于这两种作物在受到除草剂胁迫后通过根系分泌物等信号物质招募了更多的固氮细菌,形成更多的根瘤,从而促进植物根系对有效氮素的吸收,使产量有所增加。

#### 4 结论

(1)豆田常用除草剂氟磺胺草醚对不同豆科作物的影响规律不同,氟磺胺草醚的施用量建议为:春大豆、绿豆、豌豆控制在 $225\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,夏大豆可放宽至

$450\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,四季豆和蚕豆不适宜施用氟磺胺草醚。

(2)豆科作物的产量与其根部性状显著相关,高浓度( $450\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ )氟磺胺草醚会使6种豆科作物根鲜质量、根瘤数量、根瘤鲜质量显著降低。

(3)氟磺胺草醚的施用使作物根际固氮细菌的丰度显著下降,固氮菌丰度变化与豆科作物根部性状对不同浓度氟磺胺草醚的响应具有相似趋势。作物根际固氮细菌丰度的变化可能是导致结瘤能力改变的原因之一。

#### 参考文献:

- [1] WU X, XU J, DONG F, et al. Responses of soil microbial community to different concentration of fomesafen[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 273: 155-164.
- [2] KHORRAM M S, WANG Y, JIN X, et al. Reduced mobility of fomesafen through enhanced adsorption in biochar-amended soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(6): 1258-1266.
- [3] HUANG X, HE J, YAN X, et al. Microbial catabolism of chemical herbicides: Microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2017, 143: 272-297.
- [4] 曲耀训. 大豆田杂草危害与化学防除评述[J]. *农药市场信息*, 2016, 563: 6-10, 30. QU Y X. Review on weed hazards and chemical prevention in soybean field[J]. *Pesticide Market Information*, 2016, 563: 6-10, 30.
- [5] 关成宏,董爱书. 东北大豆等大田杂草发生概况及除草剂的优选方案[J]. *农药市场信息*, 2019, 650: 6-9. GUAN C H, DONG A S. The occurrence of weeds in soybean fields in northeast China and the preferred scheme of herbicides application[J]. *Pesticide Market Information*, 2019, 650: 6-9.
- [6] 李君君,戴玲玲,黄文化,等. 原卟啉原氧化酶抑制剂的作用机制及抗性进展[J]. *农药*, 2019, 58(10): 703-707. LI J J, DAI L L, HUANG W H, et al. Mechanism of action and progress of resistance to proporphyrinogen oxidase inhibitors[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(10): 703-707.
- [7] BEAM S C, FLESSNER M L, PITTMAN K B. Soybean flower and pod response to fomesafen, acifluorfen, and lactofen[J]. *Weed Technology*, 2018, 32(4): 444-447.
- [8] MENG L, SUN T, LI M, et al. Soil-applied biochar increases microbial diversity and wheat plant performance under herbicide fomesafen stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171: 75-83.
- [9] 周世雄,魏朝俊,胡海燕,等. 氟磺胺草醚对大豆根际土壤微生物和酶活性的影响及其在根际的降解[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 203-211. ZHOU S X, WEI Z J, HU H Y, et al. Effects of fomesafen on soil microorganisms, soil enzyme activities and its degradation in soybean rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 203-211.
- [10] HU H, ZHOU H, ZHOU S, et al. Fomesafen impacts bacterial communities and enzyme activities in the rhizosphere[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 302-311.

- [11] 孔祥清, 郭永霞, 李永鹏. 氟磺胺草醚土壤处理防除大豆田阔叶杂草[J]. 杂草科学, 2005, 3:41-42, 53. KONG X Q, GUO Y X, LI Y P. Soil treatment of fomesafen prevents the broad-leaved weeds from soybean fields[J]. *Weed Science*, 2005, 3:41-42, 53.
- [12] 崔文雪. 除草剂对大豆的危害[J]. 大豆科技, 2020, 3:50-51. CUI W X. The harm of herbicides to soybeans[J]. *Soybean Science & Technology*, 2020, 3:50-51.
- [13] 黄启鹏, 张亚婷, 宫香伟, 等. 11种除草剂对秋播豌豆生长发育的影响及防效研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7):1053-1066. HUANG Q P, ZHANG Y T, GONG X W, et al. Effects of eleven herbicides on the growth and weed control efficacy in autumn-sown pea[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(7):1053-1066.
- [14] 李冬刚, 骆兰平, 王汝明, 等. 不同除草剂防除夏大豆田一年生阔叶杂草的田间药效试验[J]. 现代农业科技, 2018, 17:98-99. LI D G, LUO L P, WANG R M, et al. Field efficacy trials of different herbicides against annual broadleaf weeds in summer soybean fields[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, 17:98-99.
- [15] 何艳, 黄晓伟, 程中一, 等. 新形势下大豆产地土壤环境保护与功能提升的研发建议[J]. 土壤学报, 2021, 58(2):269-280. HE Y, HUANG X W, CHENG Z Y, et al. Proposals for research on protection and functional improvement of soil environment in soybean producing area in face of the new situation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2):269-280.
- [16] GABY J C, BUCKLEY D H. A comprehensive evaluation of PCR primers to amplify the *niH* gene of nitrogenase[J]. *PLoS One*, 2012, 7:e42149.
- [17] SMALLA K, WIELAND G, BUCHNER A, et al. Bulk and rhizosphere soil bacterial communities studied by denaturing gradient gel electrophoresis: Plant-dependent enrichment and seasonal shifts revealed [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67:4742-4751.
- [18] 陈海伟, 张鲁华, 陈德富, 等. 除草剂及抗除草剂作物的应用现状与展望[J]. 生物技术通报, 2012, 10:35-40. CHEN H W, ZHANG L H, CHEN D F, et al. Current utilization status and future prospect of herbicide and herbicide-resistant crops[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2012, 10:35-40.
- [19] 朱海荣, 孙国伟. 铁丰31号、铁豆37号大豆品种除草剂筛选试验[J]. 农业科技通讯, 2018, 2:145-151. ZHU H R, SUN G W. Herbicide screening tests of the soybean species of Tiefeng 31 and Tiedou 37[J]. *Agricultural Science Newsletter*, 2018, 2:145-151.
- [20] 薛仁风, 赵阳, 庄艳, 等. 几种除草剂对绿豆田杂草的防治效果及对绿豆表型性状的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(4):101-105. XUE R F, ZHAO Y, ZHUANG Y, et al. Control effects of several herbicides on weeds and phenotype of mung bean (*Vigna radiata*) in field [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(4):101-105.
- [21] SOLTANI N, SHROPSHIRE C, SIKKEMA P H. Tolerance of mung bean to postemergence herbicides[J]. *Agricultural Sciences*, 2013, 4(10):558-562.
- [22] 杨梅, 陈新, 袁星星, 等. 不同除草剂对蚕豆田间杂草及蚕豆生长和根瘤的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(25):106-114. YANG M, CHEN X, YUAN X X, et al. The influence of several herbicides on weeds and broad bean growth and nodules in field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(25):106-114.
- [23] 王勤方, 唐永生, 郑云昆, 等. 蚕豆田间杂草群落调查及除草剂筛选应用[J]. 农业科技通讯, 2019, 5:160-164. WANG Q F, TANG Y S, ZHENG Y K, et al. Survey of weed communities in the field of broad beans and screening applications of herbicides[J]. *Agricultural Science Newsletter*, 2019, 5:160-164.
- [24] 包强, 刘传琴, 段晓明, 等. 氟磺胺草醚不同施药时期对红小豆的除草效果[J]. 现代化农业, 2008, 6:44-45. BAO Q, LIU C Q, DUAN X M, et al. The weeding effect on red beans in different application periods of fomesafen[J]. *Modern Agriculture*, 2008, 6:44-45.
- [25] 黄春艳, 王宇, 黄元炬, 等. 8种除草剂对红小豆田杂草的防除效果及对红小豆的安全性[J]. 杂草科学, 2014, 32(1):101-106. HUANG C Y, WANG Y, HUANG Y J, et al. Efficacy and selectivity of eight herbicides to *Phaseolus angularis*[J]. *Weed Science*, 2014, 32(1):101-106.
- [26] 邱喜阳, 王晨阳, 王彦丽, 等. 施氮量对冬小麦根系生长分布及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1):53-58. QIU X Y, WANG C Y, WANG Y L, et al. Effects of nitrogen application rate on root system distribution and grain yield of winter wheat cultivars[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2012, 21(1):53-58.
- [27] 陈展宇, 房晓琨, 孙帆, 等. 不同年代大豆品种根系氮代谢关键酶活性变化的研究[J/OL]. 吉林农业大学学报:1-9.(2020-12-25) <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20201225.0934.002.html>. CHEN Z Y, FANG X K, SUN F, et al. Studies on key enzyme activities of nitrogen metabolism in roots of soybean varieties released at different ages[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*: 1-9. (2020 - 12-25) <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20201225.0934.002.html>.
- [28] 申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体:协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. 土壤学报, 2021, 58(4):805-813. SHEN J B, BAI Y, WEI Z, et al. Rhizobiont: An interdisciplinary innovation and perspective for harmonizing resources, environment, and food security[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4):805-813.
- [29] DE VRIES F T, GRIFFITHS R I, KNIGHT C G, et al. Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production[J]. *Science*, 2020, 368(6488):270-274.
- [30] 禹珂, 王孝林, 张学斌, 等. 植物根系与益生菌相互作用的研究进展[J]. 植物生理学报, 2020, 56(11):2275-2287. YU K, WANG X L, ZHANG X B, et al. Advances in the study of the interaction between plant roots and probiotics[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(11):2275-2287.
- [31] 纪广影, 丁伟, 高文逸, 等. 氟磺胺草醚抑制大豆根瘤固氮酶活性与碳代谢关系的研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8):92-95. JI G Y, DING W, GAO W Y, et al. Study on the relationship between the inhibition of nitrogen fixation enzyme activity by fomesafen and carbon metabolism of soybean root nodules[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(8):92-95.