

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.005

俞海冰, 陆玉芳, 汤利, 等. 丁香酸对不同品种烟草苗期根系生长的影响. 土壤, 2024, 56(1): 35–41.

## 丁香酸对不同品种烟草苗期根系生长的影响<sup>①</sup>

俞海冰<sup>1,2</sup>, 陆玉芳<sup>2</sup>, 汤利<sup>1</sup>, 施卫明<sup>2</sup>, 高维常<sup>3</sup>, 郭亚利<sup>4</sup>, 朱迪<sup>4\*</sup>

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650500; 2 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 210008; 3 贵州省烟草科学研究院烟草行业山地烤烟品质与生态重点实验室, 贵阳 550081; 4 贵州省烟草公司黔西南州公司, 贵州兴义 562400)

**摘要:** 为探究最新发现的植物源生物硝化抑制剂丁香酸对烟草品种 K326 和云烟 85 苗期根系生长的影响, 通过基质培养试验, 设置 0、10、25、50、100、200  $\mu\text{mol/L}$  6 个丁香酸浓度, 研究了不同浓度丁香酸在不同时间(3 d 和 5 d)对 K326 和云烟 85 主根伸长量和一级侧根发育的影响。结果表明: 与对照(0  $\mu\text{mol/L}$ )相比, 25~100  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸能促进 K326 主根伸长, 在 3 d 时促进率为 13.33%~30.67%, 在 5 d 时促进率降为 8.54%~22.55%, 最适浓度为 50  $\mu\text{mol/L}$ ; 10~50  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸促进云烟 85 主根伸长, 在 3 d 时促进率为 7.81%~18.75%, 在 5 d 时促进率维持在 4.10%~10.66%, 最佳促进浓度 25  $\mu\text{mol/L}$ ; 丁香酸对两个烟草品种主根伸长的促进效果均为 3 d 优于 5 d。在侧根发育方面, 低浓度丁香酸能显著促进 K326 和云烟 85 一级侧根数, 两个品种促进侧根发育的最适浓度均为 25  $\mu\text{mol/L}$ 。相关性分析表明, 丁香酸处理下两个烟草品种苗期的主根伸长变化率与侧根数变化率呈显著正相关。可见, 适宜浓度的丁香酸对两个典型烟草品种苗期主根增长和侧根发育均为促进效应。生物硝化抑制剂丁香酸具有促进烟草根系生长的潜力, 为研发烤烟新型专用肥提供了理论依据。

**关键词:** 生物硝化抑制剂; 丁香酸; 主根伸长量; 一级侧根数量; K326; 云烟 85

**中图分类号:** S143.1+6 **文献标志码:** A

### Effects of Syringic Acid on Root Growth of Different Tobacco Varieties at Seedling Stage

YU Haibing<sup>1,2</sup>, LU Yufang<sup>2</sup>, TANG Li<sup>1</sup>, SHI Weiming<sup>2</sup>, GAO Weichang<sup>3</sup>, GUO Yali<sup>4</sup>, ZHU Di<sup>4\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650500, China; 2 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Upland Flue-Cured Tobacco Quality & Ecology Key Laboratory of China Tobacco, Guiyang 550081, China; 4 Qianxi'nian Prefecture Company of Guizhou Tobacco Company, Xingyi, Guizhou 562400, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of biological nitrification inhibitor syringic acid on the root at seedling stage growth of tobacco varieties K326 and Yunyan 85, a substrate culture experiment was conducted with six concentrations of syringic acid (0, 10, 25, 50, 100 and 200  $\mu\text{mol/L}$ ) to investigate the effects of different syringic acid concentrations on the elongation of the primary roots and lateral roots of K326 and Yunyan 85 at different time (3 d and 5 d). The results showed that compared with the control (0  $\mu\text{mol/L}$ ), syringic acid in the range of 25–100  $\mu\text{mol/L}$  promoted the primary root elongation of K326 at 3 d and 5 d by 13.33%–30.67% and 8.54%–22.55%, respectively, with the optimum concentration of 50  $\mu\text{mol/L}$ , while syringic acid in a range of 10–50  $\mu\text{mol/L}$  promoted the primary root length of Yunyan 85 at 3 d and 5 d by 7.81%–18.75% and 4.10%–10.66%, respectively, with the optimum concentration of 25  $\mu\text{mol/L}$ . The promotion of syringic acid on the primary root elongation of K326 and Yunyan 85 was better at 3 d than at 5 d. Low concentration of syringic acid significantly increased the numbers of lateral roots of K326 and Yunyan 85, with the optimum concentration of 25  $\mu\text{mol/L}$  for both varieties. Correlation analysis showed that the change rates of main root elongation and lateral root numbers of the two tobacco varieties were significantly positively correlated with syringic acid. It can be seen that the appropriate syringic acid concentration can promote the growth of main roots and lateral roots of two tobacco varieties at seedling stage. Biological nitrification inhibitor syringic acid has the potential to promote the growth of tobacco roots, providing a theoretical basis for the development of new fertilizer for flue-cured tobacco.

**Key words:** Biological nitrification inhibitor; Syringic acid; Primary root length; Number of lateral roots; K326; Yunyan85

①基金项目: 中国烟草总公司贵州省公司重点研发项目(2021XM19)和国家自然科学基金面上项目(32072670)资助。

\* 通讯作者(229422267@qq.com)

作者简介: 俞海冰(1998—), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事生物硝化抑制剂方面的研究。E-mail: 1831257680@qq.com

铵态氮和硝态氮是烟草植株能够吸收利用的速效氮源<sup>[1]</sup>。根系是植物吸收转化营养的关键部位,可以直接吸收和利用土壤中的铵态氮和硝态氮<sup>[2-4]</sup>。烟草苗期氮素即开始在根系和叶片中积累,且苗期根系活力、表面积、体积、平均直径等值越高,对烟草后期的生长发育越有利<sup>[5-6]</sup>。尽管烟草是喜硝作物,但烟草的农艺性状和产量受铵态氮和硝态氮比例(铵硝比)的影响,且铵态氮可以直接被烟草同化<sup>[6]</sup>,在苗期提高铵态氮的含量不仅可以促进根系萌发和伸长还可以提高烟草干物质的积累<sup>[7]</sup>。王蒙等<sup>[8]</sup>研究发现铵硝比 4:6 为豫中烟区浓香型烤烟生长最适宜的氮形态配比。王利超等<sup>[1]</sup>发现铵硝比 1:1 配合施用,不仅可以协调烟叶主要化学成分,还可以使致香物质的组成较为协调。介晓磊等<sup>[9]</sup>研究表明两种形态氮素的存在有助于叶片钾和氯的积累,铵态氮还有利于总糖的提高。张新要等<sup>[10]</sup>研究表明铵态氮、硝态氮合理配施,能提高烟叶的产质量,协调内在化学成分,对烟叶品质的提高有利。而氮肥在施入土壤后经过硝化作用会快速地由铵态氮转化为硝态氮。可见,合理配比的铵态氮和硝态氮施用能兼顾烟草氮素高效利用、烟叶品质 and 环境保护的要求。

目前生产上关于提升烤烟生长与氮肥利用的技术有氮肥深施、改施炭基肥、有机物料替代部分化肥、绿肥还田与高效移栽等<sup>[11-15]</sup>,但还需要寻求更加绿色环保的新措施。生物硝化抑制剂是由植物根系产生、能够抑制土壤硝化作用的一类物质,具有来源广、环境友好等优点。生物硝化抑制剂能有效抑制土壤硝化作用,减缓铵态氮转化为硝态氮的进程,是维持根际土壤合理铵硝比的一项有效策略<sup>[16-18]</sup>。目前已经有一些生物硝化抑制剂在热带牧草、水稻、玉米和高粱根系分泌物中被发现<sup>[19-23]</sup>。酚酸类化合物丁香酸(Syringic Acid, SA)是继 1,9-癸二醇后从水稻根系分泌物中鉴定出的第二个水稻源生物硝化抑制剂,它能与 1,9-癸二醇产生协同抑制土壤硝化作用的效果<sup>[24]</sup>。华瑶等<sup>[25]</sup>通过土壤微域培养试验,发现丁香酸能显著抑制在黔西南植烟土壤硝化速率 5%~51%,且抑制效率优于另一生物硝化抑制剂对羟基苯丙酸甲酯(MHPP);同时,丁香酸能抑制氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)的 *amoA* 基因丰度,并降低 21% 的  $N_2O$  排放。此外,最新研究表明,丁香酸还能在弱酸性水稻土和酸性红壤上抑制硝化作用及  $N_2O$  排放<sup>[26]</sup>。

目前生物硝化抑制剂丁香酸的研究主要关注对土壤氮转化的影响,对植物生长的影响鲜有报道。不

同生物硝化抑制剂对植物根系生长的研究主要集中在 MHPP 和水稻源 1,9-癸二醇上,但是两者的调控效果不一。Liu 等<sup>[27]</sup>研究发现 MHPP 能抑制拟南芥主根的伸长和促进侧根的发育。在药用植物紫苏中, MHPP 对主根伸长抑制作用随浓度增加而增加<sup>[28]</sup>。而水稻源生物硝化抑制剂 1,9-癸二醇则对拟南芥根系有一定的促进效果,特别是在低浓度条件下,1,9-癸二醇能促进拟南芥主根的伸长<sup>[29]</sup>。丁香酸在抑制植烟土壤硝化作用的同时,对烟草根系生长的影响如何?是否与其他生物硝化抑制剂有相似或不同的调控作用还有待探索。由此,本研究以能抑制植烟土壤硝化作用的生物硝化抑制剂——丁香酸为对象,通过室内琼脂基质试验,探讨其对贵州黔西南地区两个主栽烟草品种 K326 和云烟 85 苗期根系生长的影响及作用范围,以期能为丁香酸在烟苗培养和植烟土壤上的田间应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与试验设计

供试烟草品种为 K326、云烟 85,生物硝化抑制剂为丁香酸(Sigma-Aldrich, 美国)。

为了更好地更方便地观察烟草苗期根系的变化,采用琼脂基质进行培养试验。琼脂基质还能部分反映常规烟草幼苗育苗基质的特性。试验时,首先将烟草种子装入灭菌后的 1.5 mL 离心管中,加入 1 mL 10%  $H_2O_2$ 、10  $\mu$ L 十二烷基硫酸钠(SDS),涡旋仪涡旋均匀,保证种子灭菌完全,保持 15 min 后,在离心管表面喷洒 75% 酒精灭菌后转移入超净工作台。随后,用移液枪吸取灭菌水对种子进行冲洗 5~7 次,直至洗净为止,再加入适量 0.1% 琼脂糖溶液,使种子短暂悬浮在琼脂糖溶液中以备后续播种。使用特制播种枪头将种子播种到常规萌发培养基质(13 cm $\times$ 13 cm)上,基质成分为:2 mmol/L  $KH_2PO_4$ 、2 mmol/L  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、5 mmol/L  $NaNO_3$ 、1 mmol/L  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 、50  $\mu$ mol/L  $H_3BO_3$ 、12  $\mu$ mol/L  $MnSO_4 \cdot 2H_2O$ 、1  $\mu$ mol/L  $ZnCl_2$ 、1  $\mu$ mol/L  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 、0.2  $\mu$ mol/L  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 、100  $\mu$ mol/L EDTA(乙二胺四乙酸二钠盐,二水)、100  $\mu$ mol/L  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.5 g/L 2-(N-吗啉)乙磺酸(MES)、1% (m/V)蔗糖、0.6% (m/V)琼脂粉(用 3 mol/L NaOH 调至 pH 5.8)。其中,添加的 MES 可以起到 pH 缓冲作用,防止基质 pH 在植物生长过程中发生大幅度变化。基质板用 Parafilm 膜封口后垂直置于光照培养室中,使根沿基质表面垂直向下生长。培养室光周期为 16 h/8 h,温度(23 $\pm$ 1)  $^{\circ}C$ ,

光照强度为 8 000 lux。

丁香酸设置 6 个不同浓度：0、10、25、50、100、200  $\mu\text{mol/L}$ ，溶解于乙醇，现配现用。烟草种子在常规培养基质上发芽 7 d 后(根长达 0.6~0.7 cm)，取长势均匀的烟草幼苗转移至丁香酸处理的基质上继续生长，在培养 3 d 和 5 d 测定烟草主根长和侧根数量。每个处理设置 15 个重复。

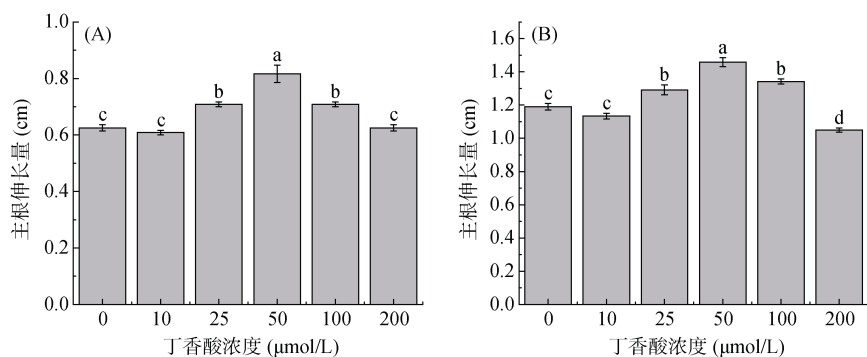
### 1.2 测定指标

**主根伸长量：**烟草移苗后在基质底部标记初始根长度<sup>[29]</sup>，在移苗后的 3 d 用直尺测量净增长量，测量后再次在基质底部做标记，5 d 后测量较 3 d 时的增长量。

**一级侧根数量：**用肉眼数出一级侧根数量<sup>[30]</sup>，并用直尺量出一级侧根长度(侧根长度大于 0.5 mm 记为一条侧根，不到 0.5 mm 记为无侧根)<sup>[31]</sup>。

### 1.3 数据处理

应用 Excel 2019 进行数据处理，数据的统计分析采用 SPSS 23.0，图表使用 Origin 2021 和 Excel 2019 制作。



(图中误差线表示 SE，柱图上方不同小写字母表示处理间差异显著(LSD,  $P < 0.05$ ), 下同)

图 1 不同浓度丁香酸对处理 3 d(A)和 5 d(B)时 K326 主根伸长量的影响

Fig.1 Effects of different syringic acid concentrations on elongation of K326 primary roots at 3 d (A) and 5 d (B)

表 1 不同浓度丁香酸处理 3 d 和 5 d 时 K326 主根伸长促进率

Table 1 Promoting rates of different syringic acid concentrations on K326 taproot elongation at 3 d and 5 d

丁香酸浓度( $\mu\text{mol/L}$ )	3 d 时促进率(%)	5 d 时促进率(%)
10	-2.67 $\pm$ 1.32	-4.76 $\pm$ 2.92
25	13.33 $\pm$ 1.32	8.54 $\pm$ 5.39
50	30.67 $\pm$ 4.87	22.55 $\pm$ 4.76
100	13.33 $\pm$ 1.32	12.75 $\pm$ 2.69
200	0.00 $\pm$ 1.77	-11.76 $\pm$ 2.26

注：表中数据为均数  $\pm$  SE 表示，下同。

### 2.2 丁香酸对烟草云烟 85 主根生长的影响

如图 2 所示，不同浓度丁香酸对烟草云烟 85 根系主根净增长也有低促高抑的效果。丁香酸处理 3 d

## 2 结果与分析

### 2.1 丁香酸对烟草 K326 主根增长的影响

如图 1 所示，不同浓度丁香酸对烟草 K326 根系主根净增长的影响表现为低浓度促进，高浓度抑制。丁香酸处理 3 d 时，在低浓度 10~50  $\mu\text{mol/L}$  范围内对 K326 主根伸长量的促进作用随浓度增加而增加，在 50  $\mu\text{mol/L}$  时丁香酸的促进作用最强达 30.67%(表 1)；在 50~200  $\mu\text{mol/L}$  浓度范围内，丁香酸对 K326 主根生长的促进效应随浓度增加而下降，在 100  $\mu\text{mol/L}$  时促进率为 13.33%，但在 200  $\mu\text{mol/L}$  时无显著影响(图 1A)。丁香酸处理 5 d 时，对 K326 主根伸长的影响与 3 d 时的效果类似。在 50  $\mu\text{mol/L}$  时，丁香酸对 K326 主根伸长量的促进率最强为 22.55%；在 200  $\mu\text{mol/L}$  时反而有一定的抑制效应(图 1B)。可见，在 25~100  $\mu\text{mol/L}$  内，丁香酸对培养 3 d 和 5 d 的 K326 主根伸长量均表现为显著的促进作用，且在 50  $\mu\text{mol/L}$  时有最强的促进效果，丁香酸的促进率在 3 d 时比 5 d 时更高(表 1)。

时，在低浓度 10~50  $\mu\text{mol/L}$  范围内对云烟 85 主根净增长的影响表现为促进，最适浓度为 25  $\mu\text{mol/L}$ ，促进效果最佳达 18.75%(表 2)；在 25~200  $\mu\text{mol/L}$  浓度范围内，丁香酸对云烟 85 主根净增长的促进效应随浓度增高而下降，在 50  $\mu\text{mol/L}$  时的促进作用虽有下降但依然显著，但从 100  $\mu\text{mol/L}$  开始，丁香酸对云烟 85 主根净增长表现为显著抑制(图 2A)。丁香酸处理 5 d 时，对云烟 85 主根伸长的影响与 3 d 时类似。在 25  $\mu\text{mol/L}$  时，丁香酸对云烟 85 主根伸长促进效率最强，为 10.66%；在 100~200  $\mu\text{mol/L}$  浓度范围内，丁香酸对云烟 85 主根伸长有一定的抑制作用(图 2B)。可见，丁香酸在低浓度 25~50  $\mu\text{mol/L}$  时能显著促进云烟 85 主根伸长，且丁香酸的促进效率 3 d 时优于 5 d 时(表 2)。

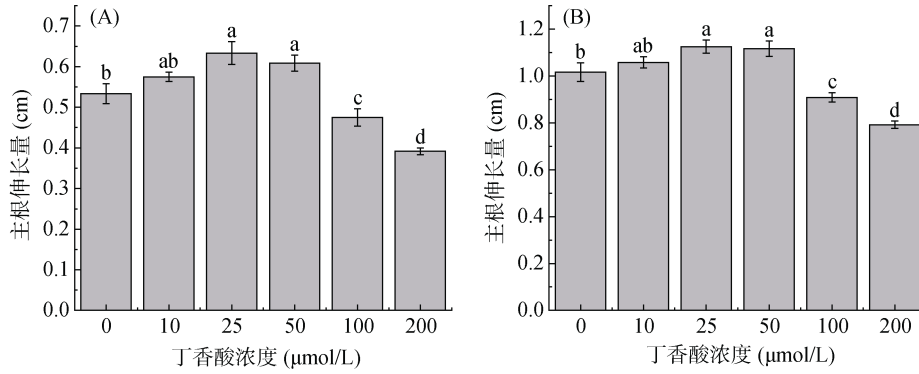


图 2 不同浓度丁香酸对处理 3 d(A)和 5 d(B)时云烟 85 主根伸长量的影响

Fig. 2 Effects of different syringic acid concentrations on elongation of Yunyan85 primary roots at 3 d (A) and 5 d (B)

表 2 不同浓度丁香酸处理 3 d 和 5 d 时云烟 85 主根伸长促进率

Table 2 Promoting rates of different syringic acid concentrations on Yunyan85 taproot elongation at 3 d and 5 d

丁香酸浓度( $\mu\text{mol/L}$ )	3 d 时促进率(%)	5 d 时促进率(%)
10	7.81 $\pm$ 2.11	4.10 $\pm$ 4.97
25	18.75 $\pm$ 5.26	10.66 $\pm$ 5.86
50	14.06 $\pm$ 3.78	9.84 $\pm$ 6.94
100	-10.94 $\pm$ 4.03	-10.66 $\pm$ 4.18
200	-26.56 $\pm$ 1.57	-22.13 $\pm$ 3.20

### 2.3 丁香酸对 K326 和云烟 85 侧根数的影响

如图 3 所示, 处理 5 d 时, 不同浓度丁香酸对

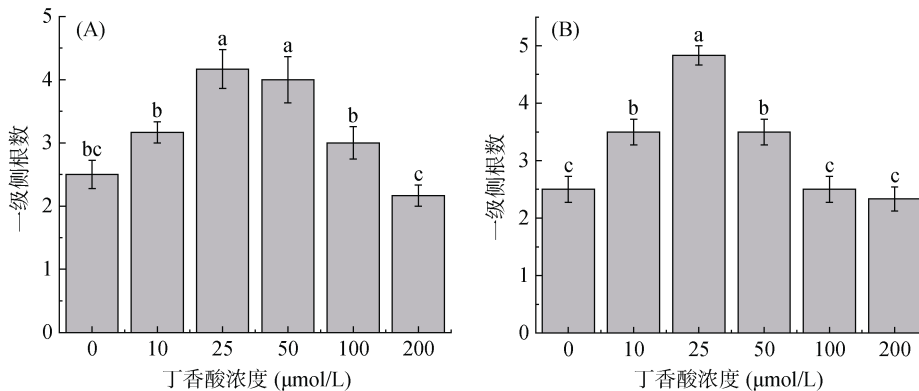


图 3 不同浓度丁香酸对 K326(A)和云烟 85(B)侧根数量的影响

Fig. 3 Effects of different syringic acid concentrations on numbers of lateral roots of K326 and Yunyan 85

表 3 不同浓度丁香酸处理对烟草 K326 和云烟 85 侧根数的促进率

Table 3 Promotion rates of different syringic acid concentrations on numbers of lateral roots of tobacco K326 and Yunyan 85

丁香酸浓度( $\mu\text{mol/L}$ )	K326(%)	云烟 85(%)
10	26.67 $\pm$ 6.67	40.00 $\pm$ 8.94
25	66.67 $\pm$ 12.29	93.33 $\pm$ 14.60
50	60.00 $\pm$ 14.60	40.00 $\pm$ 8.94
100	20.00 $\pm$ 10.32	0.00 $\pm$ 8.94
200	-13.33 $\pm$ 6.67	-6.67 $\pm$ 8.43

K326 和云烟 85 一级侧根数量的影响表现为低促高抑的作用。25 ~ 50  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸显著促进 K326 侧根发生; 10  $\mu\text{mol/L}$  和 100  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸促进 K326 烟草侧根发生, 但效果不显著; 200  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸对 K326 侧根发生有一定抑制作用但不显著; 其中 25  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸是促进烟草 K326 侧根发育的最适浓度(图 3A)。由图 3B 可知, 10 ~ 50  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸均能显著促进云烟 85 侧根发育, 100 ~ 200  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸对云烟 85 侧根发育无显著影响, 其中 25  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸是促进烟草云烟 85 侧根发育的最适浓度。

### 2.4 丁香酸处理下烟草主根增长促进率和侧根发育促进率的相关性

如图 4 所示, 将丁香酸处理下烟草 K326 和云烟 85 主根长和侧根数的促进率进行相关性分析, 发现两个品种的主根长变化率和侧根数变化率呈显著正相关( $R^2=0.59$ ,  $P<0.01$ ), 即丁香酸对烟草苗期主根和侧根生长的调控是一致的, 能同时促进主根伸长和侧根发育。在 25 和 50  $\mu\text{mol/L}$  添加浓度时, 丁香酸能同时促进两个烟草品种的主根长和侧根数;

在 200  $\mu\text{mol/L}$  时，丁香酸对主根长和侧根数反而有一定的抑制效应。值得注意的是，处理 5 d 时，25 和 50  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸对云烟 85 主根增长的促进率低于 K326，但对云烟 85 侧根数的促进反而强于 K326。

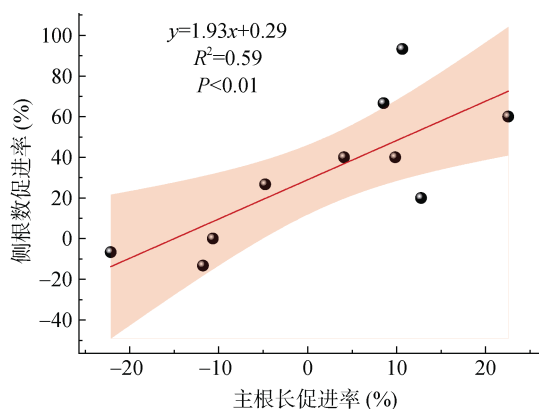


图 4 丁香酸处理下 K326 和云烟 85 主根伸长和侧根发育促进率的相关性

Fig. 4 Correlation between stimulations of primary root elongation and lateral root development of K326 and Yunyan 85 by Syringic acid

### 3 讨论

酚酸类物质广泛存在于植物根系分泌物中，是根系代谢物中重要的组成成分。本课题前期研究发现，酚酸类生物硝化抑制剂丁香酸能抑制贵州黔西南植烟土壤的硝化作用和  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[25]</sup>。本研究在此基础上，进一步发现丁香酸对两个典型烟草品种的苗期根系生长均具有低促高抑的调控作用。这与一些酚酸类物质在其他植物品种上的效果类似。葛杰克等<sup>[32]</sup>研究发现，外源添加低浓度(50 mg/kg)酚酸类物质对羟基苯甲酸能促进栝楼根系伸长，且随着浓度升高，其促进效应转变为抑制作用。王戈<sup>[33]</sup>发现烟草根系分泌物中酚酸类混合物对烟草幼苗地下部生物量有低促高抑的作用。在生物硝化抑制剂对根系调控方面，最新研究发现，1,9-癸二醇在 100 ~ 400  $\mu\text{mol/L}$  范围内能促进拟南芥苗期主根伸长和侧根发育，但在高浓度 800  $\mu\text{mol/L}$  时反而有抑制作用<sup>[29]</sup>，这与本研究丁香酸对烟草根系生长低促高抑的效应一致。然而，另外一种生物硝化抑制剂 MHPP 在 0 ~ 80  $\mu\text{mol/L}$  浓度范围内却显著抑制了拟南芥主根伸长<sup>[27]</sup>。这些生物硝化抑制剂对根系调控效果的差异可能是由于其化学结构不同，导致调控模式不同。丁香酸能促进两个烟草主栽品种 K326 与云烟 85 的主根伸长，在处理 3 d 和 5 d 时都能促进主根增长，效果稳定，表明合适浓度的丁香酸能维持较稳定的正向调控作用，在种植烤烟时可以考虑在基肥或烟苗培养基质中适

当增加丁香酸，有助于促进烟株幼苗的生长以及根系的发育。

本研究中，丁香酸对主栽品种 K326 和云烟 85 侧根发育的影响与主根类似，表现为低促高抑的趋势。低浓度 10 ~ 50  $\mu\text{mol/L}$  范围内丁香酸能促进 K326 和云烟 85 侧根的发育，这与 MHPP 在 40 ~ 80  $\mu\text{mol/L}$  时促进拟南芥侧根发育和在 20 ~ 40  $\mu\text{mol/L}$  时促进药用紫苏侧根发育的结果相似<sup>[27-28]</sup>，说明生物硝化抑制剂可能是一种潜在的侧根促生剂。本研究进一步发现丁香酸对两个典型烟草品种苗期主根和侧根生长有一致的调控效应，这表明适合浓度丁香酸添加对烟草苗生长有正面的调控效应。但 25 ~ 50  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸对处理 5 d 时云烟 85 主根增长的促进率低于 K326，对云烟 85 侧根数的促进率反而强于 K326。随着培养时间的增长，丁香酸对两个品种 5 d 时的主根促进率均低于 3 d 时。这些结果表明，丁香酸对烟草主根增长促进率的降低可能与其后期促进侧根发育有关<sup>[34-35]</sup>。

Mandal 等<sup>[36]</sup>研究发现，酚酸类物质会对生长素吲哚乙酸(IAA)的合成产生影响，通过抑制或激活 IAA 降解酶刺激或抑制 IAA 的产生，还可通过保持 IAA 氧化酶和过氧化酶的辅助因子处于活跃状态来刺激 IAA 的活性，从而促进根系的生长。因此，生长素可能介导了低浓度丁香酸对烟草苗期根系的促生作用，但具体的调控机制还有待进一步探究。

丁香酸作为生物硝化抑制剂不仅能抑制烟株根际土壤的硝化作用，还能调控烟草根系的生长，可作为一种环境友好的新型氮肥增效剂和根系促生剂。本研究发现丁香酸对 K326 主根促进效果优于云烟 85，但对云烟 85 的侧根发育促进优于 K326，未来有待在更多的烟草品种中和田间试验中测试丁香酸的效果。植株对土壤营养的吸收受其根系生长状况的影响<sup>[37]</sup>。本研究中，外源添加一定浓度的丁香酸能促进烟草 K326 和云烟 85 根系发育，这为丁香酸今后在不同烟草品种上的推广应用提供了可能性。因为苗期根系越发达，其生理活性越强，烟株自抗能力越高，同时有益微生物与烟草根系形成互惠互利的共生关系，能明显改善烟株的农艺性状，提高烟叶外观质量，协调化学成分，最后提高其经济效益，减少环境风险<sup>[38-39]</sup>。

### 4 结论

外源添加适宜浓度的生物硝化抑制剂丁香酸均能促进烟草品种 K326 和云烟 85 的主根增长。低

浓度丁香酸对不同烟草品种侧根发育也有促进效应, 25  $\mu\text{mol/L}$  丁香酸能够显著提高 K326 和云烟 85 的一级侧根数量。随着培养时间增加, 丁香酸对烟草主根增长促进效应减弱, 可能更有利于后期侧根发育。丁香酸能够促进贵州当地主栽品种烟草的根系发育, 为今后研发新型的烟草优质专用肥提供了理论指导。

### 参考文献:

- [1] 王利超, 王涵, 朴世领, 等. 铵硝氮配比对烤烟生长生理及产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 136–144.
- [2] 高维常, 蔡凯, 曾陨涛, 等. 农用地膜残留对土壤氮素运移及烤烟根系生长的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1556–1563.
- [3] 陈沂岭, 赵学强, 张玲玉, 等. 铵硝营养对水稻氮效率和矿质养分吸收的影响[J]. 土壤, 2019, 51(2): 243–250.
- [4] 黄玲, 翁贤权, 侯利涵, 等. 不同形态氮及钾营养对栲树苗生长和氮吸收的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(9): 39–47.
- [5] 徐威, 王晓巍, 王文丽, 等. 烟草漂浮育苗基质配方的筛选[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 131–139.
- [6] 李玉静, 冯雨晴, 赵园园, 等. 硝态铵态氮比例对不同氮效率烟草苗期氮素吸收及利用的影响[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(1): 23–35.
- [7] 宋文静, 宋科, 董建新, 等. 铵硝混合营养对烟草苗期氮代谢酶及内源生长素的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 100–104.
- [8] 王蒙, 王喜枝, 刘世亮, 等. 铵态氮/硝态氮比对豫中烟区烤烟生长及品质调控研究[J]. 河南农业科学, 2016, 45(4): 37–42.
- [9] 介晓磊, 黄向东, 刘世亮, 等. 不同氮素供应对烟草品质指标的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1150–1153.
- [10] 张新要, 姜占省, 李天福, 等. 不同饼肥用量和氮素形态比对烤烟产质量的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 867–870.
- [11] 祖韦军, 潘文杰, 张金召, 等. 耕作深度与翻压绿肥对植烟土壤微生物功能多样性及酶活性的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(10): 2383–2393.
- [12] 陈懿, 林英超, 杨志晓, 等. 炭基肥对黄壤烤烟生理和氮素吸收与平衡的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 864–872.
- [13] 李青山, 王德权, 高政绪, 等. 氮肥配施纳米碳对植烟土壤氮素转化及  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 土壤, 2021, 53(2): 258–264.
- [14] 李孝刚, 彭曙光, 靳志丽, 等. 有机物料对植烟土壤氮素矿化及微生物性质的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 225–234.
- [15] 林叶春, 陈伟, 陈懿, 等. 井窖式移栽对烟苗生长和光合特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 120–126.
- [16] 陆玉芳, 施卫明. 生物硝化抑制剂的研究进展及其农业应用前景[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 545–557.
- [17] Subbarao G V, Searchinger T D. Opinion: A more ammonium solution to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(22): e2107576118.
- [18] 曾后清, 朱毅勇, 王火焰, 等. 生物硝化抑制剂——一种控制农田氮素流失的新策略[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 382–388.
- [19] Zakir H A K M, Subbarao G V, Pearse S J, et al. Detection, isolation and characterization of a root-exuded compound, methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate, responsible for biological nitrification inhibition by *Sorghum* (*Sorghum bicolor*)[J]. The New Phytologist, 2008, 180(2): 442–451.
- [20] Subbarao G V, Nakahara K, Ishikawa T, et al. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization[J]. Plant and Soil, 2013, 366(1): 243–259.
- [21] Subbarao G V, Nakahara K, Hurtado M P, et al. Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* pastures[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(41): 17302–17307.
- [22] Sun L, Lu Y F, Yu F W, et al. Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen-use efficiency[J]. The New Phytologist, 2016, 212(3): 646–656.
- [23] Otaka J, Subbarao G V, Ono H, et al. Biological nitrification inhibition in maize—Isolation and identification of hydrophobic inhibitors from root exudates[J]. Biology and Fertility of Soils, 2022, 58(3): 251–264.
- [24] Lu Y F, Zhang X N, Ma M K, et al. Syringic acid from rice as a biological nitrification and urease inhibitor and its synergism with 1, 9-decanediol[J]. Biology and Fertility of Soils, 2022, 58(3): 277–289.
- [25] 华瑶, 陆玉芳, 高维常, 等. 生物硝化抑制剂对黔西南黄壤硝化作用及  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 512–519.
- [26] Lu Y F, Hua Y, Lv N, et al. Syringic acid from rice roots inhibits soil nitrification and  $\text{N}_2\text{O}$  emission under red and paddy soils but not a calcareous soil[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1099689.
- [27] Liu Y Y, Wang R L, Zhang P, et al. The nitrification inhibitor methyl 3-(4-hydroxyphenyl)propionate modulates root development by interfering with auxin signaling via the NO/ROS pathway[J]. Plant Physiology, 2016, 171(3): 1686–1703.
- [28] Ma J H, Cao Y H, Sun L L, et al. Methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate modulates plant growth and secondary metabolite accumulation by inducing metabolic changes in *Perilla frutescens*[J]. Plant and Soil, 2020, 453(1): 577–593.
- [29] Ma M K, Lu Y F, Di D W, et al. The nitrification inhibitor 1, 9-decanediol from rice roots promotes root growth in *Arabidopsis* through involvement of ABA and PIN<sub>2</sub>-mediated auxin signaling[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 280: 153891.

- [30] 梁栋. IAA 和 BR 参与干旱胁迫影响烟草侧根发育的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [31] 冯晓宇, 李光杰, 董刚强, 等. 不同浓度  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{K}^+$  处理对拟南芥突变体 *amos2* 侧根发育的影响[J]. 植物生理学报, 2013, 49(5): 463–468.
- [32] 葛杰克, 叶雨蒙, 楼雪怡, 等. 酚酸化感作用对栝楼生理特性及根际微生态的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 258–266, 272.
- [33] 王戈. 烤烟不同品种根系分泌物与黑胫病抗性关系研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2012.
- [34] 马新明, 刘国顺, 王小纯, 等. 烟草根系生长发育与地上部相关性的研究[J]. 中国烟草学报, 2002, 8(3): 26–29.
- [35] 黄泽春, 彭海峰, 屠乃美, 等. 不同农艺措施对烟草根系生长影响的研究进展[J]. 作物研究, 2008, 22(S1): 466–469.
- [36] Mandal S, Mandal M, Das A, et al. Stimulation of indoleacetic acid production in a *Rhizobium* isolate of *Vigna mungo* by root nodule phenolic acids[J]. Archives of Microbiology, 2009, 191(4): 389–393.
- [37] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报, 1992, 29(3): 239–250.
- [38] 马存金, 任士伟, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥用量对烟草根系发育及烟叶质量的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(31): 7–12.
- [39] 农传江, 汤利, 徐智, 等. 有机肥部分替代化肥对土壤有机碳库和烤烟经济性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 70–75.