

张继旭,张继光,孔凡玉,等. 四环素对土壤碳氮矿化及烟草种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):54-58.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.015

四环素对土壤碳氮矿化及烟草种子萌发的影响

张继旭^{1,2,3}, 张继光², 孔凡玉², 中国明², 王 瑞⁴, 高 林², 刘文涛⁵,

窦玉青², 毛新新², 王红刚^{1,2}, 张忠锋²

(1. 青岛农业大学农学与植物保护学院, 山东青岛 266109; 2. 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101;

3. 云南省烟草公司昆明市公司, 云南昆明 650011; 4. 湖北省烟草公司恩施州分公司, 湖北恩施 445000;

5. 临沂市烟草公司, 山东临沂 276001)

摘要:为明确抗生素残留的烟田生态效应,采用微宇宙试验系统研究四环素添加对土壤碳氮矿化及烟草种子萌发的影响。结果表明,中低量四环素添加(50、5 mg/kg)处理对土壤有机碳矿化速率无明显影响,但高添加量(500 mg/kg)处理的土壤有机碳累积矿化量在培养后期明显高于其他处理,在培养结束时比对照增加 13.75%,显示对土壤有机碳矿化的一定刺激作用。四环素添加处理的土壤有机氮的矿化速率及硝化速率整体上均高于对照,特别是在培养前期(28 d)的土壤氮素硝化速率明显高于对照,后期则与对照差异不大。低浓度四环素溶液对烟草种子的发芽势及发芽率均无显著影响,但高浓度四环素溶液(>80 mg/L)则对烟草种子的发芽势和发芽率有显著抑制作用($P < 0.05$)。此外,四环素浓度与烟草种子根长的抑制率间具有良好的剂量-效应关系。其对根伸长抑制率的 IC_{10} 、 IC_{50} 分别为 6.65、110.20 mg/L,而且根伸长抑制率与四环素浓度呈对数相关且相关性显著($P < 0.05$)。四环素长期暴露会在一定程度上影响烟田土壤的碳氮转化功能,并对烟草幼苗的生长发育具有不良影响,但四环素进入农田后对土壤养分转化及烟草生长发育的具体影响机制及其风险评价还需要进一步研究。

关键词:四环素;烟草;碳矿化;氮矿化;根伸长;种子萌发

中图分类号:S482.2*8 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)15-0054-05

四环素作为一类具有杀灭或抑制除放线菌外其他微生物作用的广谱性抗生素,在世界范围内使用量巨大,尤其作为禽畜疾病预防药物和生长促进剂而被大量用作饲料添加剂^[1-2],而未被机体吸收的部分原药或尚有活性的代谢物随畜禽粪便排出进入水体和土壤环境,造成四环素在环境中的残留^[3-6]。由于四环素类抗生素性质相对稳定并具有一定的持久性,目前在土壤、地表水、地下水中均检测到了四环素残留。Warman 等在用鸡粪施肥的土壤中发现,氯四环素的含量水平已经接近其他农药类有机污染物的水平^[7]。四环素类抗生素的环境行为、对土壤生态过程及其对作物种子萌发

的影响目前受到广泛关注^[8-11]。

烟草作为我国重要的经济作物之一,在我国中南及西南地区广泛种植,烟草在育苗栽培过程中通常大量施用有机类肥料,其中畜禽粪便类农家肥及以此为原料制作的商品有机肥的施用,易导致土壤及水环境的抗生素残留污染。近年来,关于四环素类抗生素对土壤呼吸、氮硝化及不同作物种子萌发影响的研究较多^[8-11],但四环素残留对烟田土壤养分转化及烟草幼苗毒性效应的影响还鲜见报道。为此,本研究以典型的广谱性抗生素——四环素为研究对象,采用微宇宙试验,模拟不同浓度四环素添加后对烟田土壤碳氮矿化及烟草种子萌发的影响,以明确四环素残留对烟田土壤生态过程及烟草种子萌发的生态毒理效应,为后续畜禽粪便类有机肥施用的烟田环境风险评估及合理应用管理提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年在湖北省恩施州清江源现代烟草农业科技园园区温室中进行。供试土壤采自恩施州白果乡茅坝槽烟田

收稿日期:2017-02-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:41201291);中国农业科学院科技创新工程(编号:ASTIP-TRIC06);中国烟草总公司科技重点项目(编号:110201402007、110201202014)。

作者简介:张继旭(1988—),男,山东临朐人,硕士,主要研究方向为烟草栽培生理。E-mail:zhangjixu2088@126.com。

通信作者:张忠锋,硕士,研究员,主要研究方向为植物功能成分与综合利用。E-mail:zhangzhongfeng@caas.cn。

[6]包开花,蒙美莲,陈有君,等. 覆膜方式和保水剂对旱作马铃薯光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(3):139-143,159.

[7]高玉红,牛俊义,徐 锐,等. 不同覆膜方式对玉米叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响[J]. 草业学报,2012,21(5):178-184.

[8]王 雯,张 雄. 不同灌溉方式对马铃薯光合特性的影响[J]. 安康学院学报,2015,27(4):1-6,15.

[9]秦玉芝,陈 珏,邢 铮,等. 低温逆境对马铃薯叶片光合作用的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2013,39(1):26-30.

[10]张恒嘉,李 晶. 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J]. 农业机械学报,2013,44(10):143-151.

[11]曹 莉,秦舒浩,张俊莲,等. 垄沟覆膜栽培方式对马铃薯土壤酶活性及土壤微生物数量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2012,47(3):42-46.

周边的林地表层,土壤类型为黄棕壤,土样采集后经自然风干,剔除根系等杂物,碾碎过 2 mm 筛后备用。其基本理化性质为 pH 值 6.9,有机质含量 19.23 g/kg,碱解氮含量 85.37 g/kg,有效磷含量 62.70 g/kg,速效钾含量 218.67 g/kg,未检出四环素残留。供试烟草品种为云烟 87,来源于玉溪中烟种子有限责任公司。所用四环素盐酸盐(纯度 97.5%)来源于中国食品药品检定研究院。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 微宇宙试验 将过 2 mm 筛的风干土样加入去离子水至最大田间持水量的 40%,在 25 ℃ 黑暗处预培养 1 周,以恢复土壤微生物活性,然后进行四环素矿化试验。试验设置 1 个对照和 3 个不同质量分数的四环素添加处理,分别为 CK(四环素添加量为 0 mg/kg)、ST₁(四环素添加量为 5 mg/kg)、ST₂(四环素添加量为 50 mg/kg)、ST₃(四环素添加量为 500 mg/kg),每个处理重复 3 次。

土壤有机碳的矿化:称取相当于 50 g 干土的预培养土样于 150 mL 塑料瓶中,加入相应质量的四环素,混匀,使土壤含水量达到最大田间持水量的 60%,同时设不加土壤样品的空白对照和不添加四环素的对照,放于 1 L 培养瓶中,同时在培养瓶中小心地放入 1 个内装 10 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液的 50 mL 三角瓶,以吸收土壤在培养期间释放的 CO₂,并在培养瓶底部加入少量蒸馏水以保持土壤湿度,密封后置于 28 ℃ 恒温恒湿箱中培养,在培养 1、3、7、14、21、27、42、56、84 d 后取各处理的试验样品,定期测定土壤在培养期间 CO₂ 的释放量。

土壤有机氮的矿化及硝化:称取预培养的一定量土样于 150 mL 塑料瓶中,加入不同质量的四环素,混匀,并使土壤含水量达到最大田间持水量的 60%,同时设不加四环素的对照,将各处理置于 28 ℃ 恒温恒湿箱内培养,于土壤培养的 1、3、7、14、21、27、42、56、84 d 后取各处理的试验样品,测定土壤中硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)含量(质量分数)。培养过程中每隔 3 d 用称质量法补充水分,以保持土壤湿度。

1.2.2 种子萌芽试验 按 GB/T 3543—1995《农作物种子检验规程》进行。在直径 9 cm 的玻璃培养皿中放 3 层滤纸,加入不同浓度的 5 mL 四环素溶液,在水溶液中设置 0、10、20、40、80、160 mg/L 6 个浓度梯度,每个处理设 50 粒种子,共 3 个重复。置于 28 ℃、4 000 lx 的恒温培养箱中培养,进行种子发芽与根伸长试验。

1.2.3 土壤有机碳氮矿化的测定 添加四环素后土壤在培养期间的 CO₂ 释放量采用 BaCl₂ 沉淀酸碱滴定法测定^[12];土

壤中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量用 2 mol/L KCl 溶液浸提,吸取浸提液用分光光度法测定^[13];土壤氮矿化速率、硝化速率参照文献[14—15]计算,公式如下:

$$\text{矿化速率}[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})] = (M_t - M_0)/\Delta t;$$

$$\text{硝化速率}[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})] = (N_t - N_0)/\Delta t。$$

式中: M_0 、 M_t 分别表示培养前、培养后无机态氮(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)的含量,mg/kg; N_0 、 N_t 分别表示培养前、培养后硝态氮的含量,mg/kg; t 表示培养时间,d。

1.2.4 种子发芽势、发芽率和根伸长抑制率的测定 根据处理 7、14 d 时的种子发芽数分别计算发芽势和发芽率。计算公式如下:

$$\text{发芽势} = (\text{7 d 内发芽种子数} / \text{供试种子总数}) \times 100\%;$$

$$\text{发芽率} = (\text{培养结束时发芽种子数} / \text{供试种子总数}) \times 100\%;$$

$$\text{根伸长抑制率} = (\text{对照组根长} - \text{处理组根长}) / \text{对照组根长} \times 100\%。$$

1.3 数据分析

试验结果由 SPSS 22.0 进行模型拟合,计算出四环素的根伸长 10% 抑制浓度(IC₁₀)和 50% 抑制浓度(IC₅₀);采用 Excel 2007 对所有试验数据进行统计整理并作图。

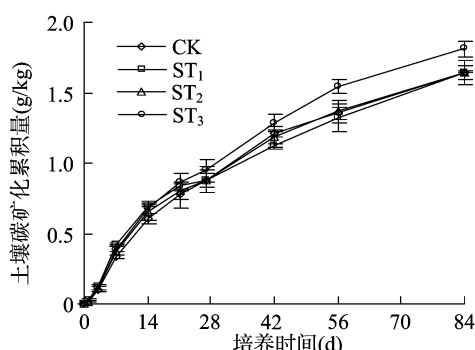
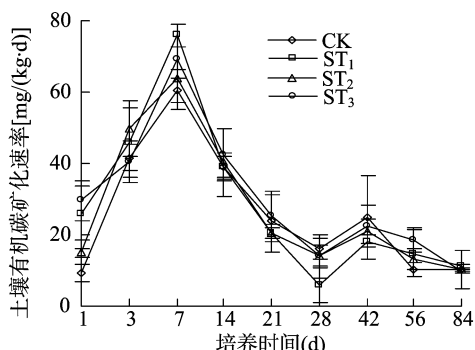
2 结果与分析

2.1 四环素对土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的影响

从图 1 可以看出,在培养的第 1 天,各处理土壤有机碳的矿化速率依次为 ST₃ > ST₁ > ST₂ > CK。各处理的矿化速率随培养时间延长迅速上升,到培养 7 d 时达到最大值,具体表现为 ST₁ > ST₃ > ST₂ > CK,此时四环素各处理的有机碳矿化速率均高于 CK,随后开始下降。培养 14 d 后各处理与 CK 的差异不断减小,至 84 d 后培养结束时,各处理土壤的有机碳矿化速率与对照无明显差异。不同处理的土壤有机碳累积矿化量在培养前期(前 14 d)增加较快,随后变缓并持续增加至培养结束。在整个培养过程中,ST₁、ST₂ 处理的有机碳累积矿化量与 CK 相比无明显差异,仅在培养第 28 天之后,ST₃ 处理的累积矿化量才明显高于 CK 处理,至培养结束时比 CK 增加 13.75%。可见,中低量四环素添加(50、5 mg/kg)对土壤有机碳矿化无明显影响,而较高量(500 mg/kg)的四环素则在一定程度上促进有机碳矿化,特别在培养后期表现出累积矿化量的增加。

2.2 四环素对土壤氮矿化速率及硝化速率的影响

从图 2 可以看出,添加四环素后均不同程度地促进了土



a. 土壤有机碳矿化速率

b. 土壤有机碳累积矿化量

图1 四环素对土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的影响

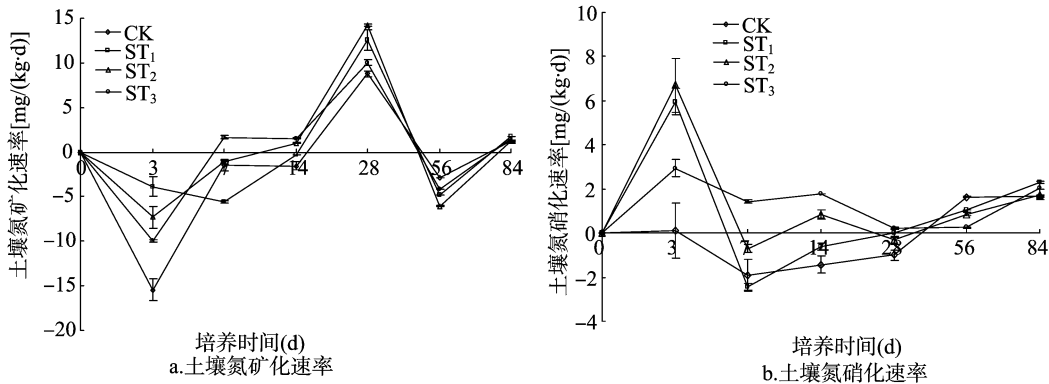


图2 四环素对土壤氮矿化速率及硝化速率的影响

壤氮素的转化。其中各处理土壤的有机氮矿化速率变化趋势基本一致,随培养时间延长大致呈“W”形波动。在培养前期(前 7 d),各处理的氮素矿化速率均为负值,且不同处理土壤的有机态氮矿化速率差异较大,但处理间的差异随着培养时间的延长而不断减小,至培养结束时,添加四环素各处理的氮矿化速率与 CK 无明显差异。在整个培养过程中,各处理土壤氮的硝化速率变化均随培养时间延长呈现先增加后降低再趋于稳定的趋势。四环素处理的土壤氮素硝化速率整体上高于 CK,后期则与 CK 处理基本一致。结果显示,四环素添加能在一定程度上刺激土壤氮素的矿化及硝化作用,并随着培养时间延长其激发作用不断减弱。

2.3 四环素对烟草种子萌发的影响

从表 1 可以看出,随着四环素溶液浓度的增大,烟草种子的发芽势与发芽率总体上均呈下降趋势。但当四环素溶液浓度较低时(≤ 40 mg/L),其对烟草种子发芽势与发芽率的影响与对照(0 mg/L)相比差异均不显著;当四环素浓度达到 160 mg/L 时,烟草种子的发芽势与对照相比差异显著($P < 0.05$),且比对照降低 12.5 个百分点。对于发芽率来说,四环素浓度为 80、160 mg/L 时与对照差异显著,且分别比对照下降 15.2、25.7 个百分点。因此,较低浓度的四环素溶液(40 mg/L)对烟草种子发芽没有明显影响,但随着浓度升高,烟草种子发芽势与发芽率受影响的程度随之增加,表现出一定的剂量-效应关系。

表 1 四环素对烟草种子发芽势和发芽率的影响

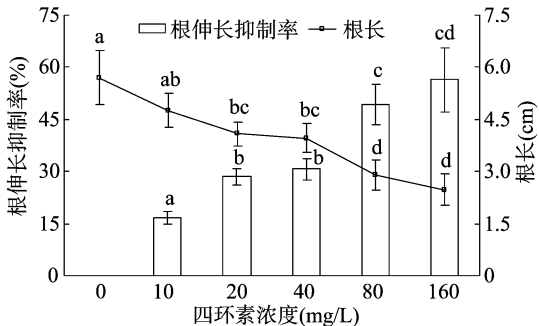
四环素浓度 (mg/L)	发芽势 (%)	发芽率 (%)
0	88.0a	90.2a
10	89.3a	89.7a
20	86.7a	86.6a
40	86.0a	84.3a
80	84.2ab	75.0b
160	75.5b	64.5c

注:同列数据后标有不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.4 四环素对烟草根伸长及根伸长抑制率的影响

从图 3 可以看出,本试验范围内的 5 种不同浓度的四环素均对烟草根长具有不同程度的抑制效应。随着四环素浓度的增加,根长呈逐渐下降的趋势,根伸长抑制率呈逐渐上升的趋势。在不添加四环素的对照中,烟草的根长为 5.70 cm,当

四环素浓度为 10 mg/L 时,根长与对照处理差异不显著;当四环素浓度为 20 mg/L 时,与对照处理的根长差异显著;当四环素浓度为 160 mg/L 时,烟草的根长仅为 2.48 cm,根伸长抑制率为 56.49%。



不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图3 四环素对烟草根伸长的影响

当前经常采用植物的 IC_{50} 来评价污染物的生态毒性强弱^[16-17],但当环境中污染物的浓度达到 IC_{50} 时,表明植物已经受到严重影响,所以 IC_{10} 通常被认为是引起植物受害的毒性阈值^[11]。由表 2 可以看出,在水溶液中,烟草根伸长抑制率与四环素浓度呈对数正相关,且相关性显著($P < 0.05$),随着四环素浓度升高,根长随之减少而根长抑制率呈对数增加,而且四环素对根伸长抑制率的 IC_{10} 、 IC_{50} 分别为 6.65、110.20 mg/L,即烟草根伸长被抑制 50% 时的四环素浓度为 110.20 mg/L,四环素浓度对烟草根伸长抑制率具有明显的剂量-效应关系。

表 2 烟草的根伸长与四环素的抑制率方程及其敏感性

拟合方程	r^2	n	IC_{10} (mg/L)	IC_{50} (mg/L)
$y = 14.472 \ln x - 17.097$	0.958	5	6.65	110.20

注:介质为水溶液。

3 讨论与结论

土壤有机碳矿化(微生物呼吸)和氮转化能力是衡量土壤微生物活性的重要指标,二者的动态变化直接反映了土壤生态系统功能的变化^[18]。四环素添加通过杀灭或抑制土壤中的某些微生物类群,从而影响土壤的微生物群落及造成其一系列生态功能的改变,如土壤有机质分解、氮转化及酶活性等^[19]。从研究结果来看,四环素各处理的有机碳矿化速率均不同程度地高于 CK,但到培养结束时,各处理与对照间无明显

差异,其原因一方面可能是在培养后期,随着添加的四环素不断降解,其浓度下降至不能对土壤碳矿化产生明显影响的水平;另一方面,受四环素胁迫影响,土壤微生物群落发生选择性改变,并迅速恢复到原来的群落功能,从而使土壤呼吸(碳矿化)速率得以恢复^[20]。中低量四环素添加(50、5 mg/kg)对土壤有机碳矿化无明显影响,而高量(500 mg/kg)的四环素则在一定程度上促进有机碳矿化,特别在培养后期表现出累积矿化量的明显增加。总体来看,添加四环素各处理的土壤有机碳累积矿化量略高于 CK,且在试验浓度范围内随四环素添加量的增加而升高。这也说明添加四环素会在一定程度上刺激土壤有机碳的矿化,其原因可能是四环素作为含碳丰富的物质,会被土壤中某些抗性微生物作为碳源利用,促进了微生物的生长繁殖,从而提高了土壤的呼吸作用^[21];而且抗生素的“非靶标微生物”耐受性和活性增强也会使土壤呼吸作用得以促进^[22]。但也有研究认为,施用抗生素后能杀死土壤中某些微生物,会使土壤呼吸作用受到抑制^[23-24],或者在试验条件下添加抗生素并没有对土壤呼吸产生影响^[25]。这种差异的产生可能与复杂的土壤理化性质、不同的微生物群落组成及其对外界胁迫的耐受程度有关。

四环素对土壤氮素矿化和硝化的影响具有时间依赖型,在培养前期均不同程度提高了土壤氮素的矿化速率及硝化速率,在培养后期的影响则不断减弱,这对土壤中硝酸盐的积累及其氮素损失具有一定风险。各处理土壤有机氮的矿化速率在培养前期(前 7 d)出现负值,说明初始土壤的氮转化主要表现为硝化作用,大量的铵态氮向硝态氮转化,这可以从四环素对土壤硝化作用的结果看出。有研究表明,四环素类抗生素能显著增加土壤中的铵根离子含量,在一定程度促进土壤的氮矿化,其原因可能与土壤中真菌类微生物的增加从而促进了相关酶的活性有关^[26]。本研究中各处理土壤硝化速率呈现先增大后减小再缓慢增加至稳定的趋势,特别在培养前期(前 28 d),四环素添加各处理的土壤氮素硝化速率明显高于对照,表明添加四环素能在一定程度上刺激土壤的硝化作用,这对烟田土壤中硝态氮的淋失及反硝化作用造成的氮素损失具有一定风险。目前关于四环素对土壤硝化作用影响的研究所得结论并不一致,杨基峰等的研究表明,氧四环素在低质量分数下对硝态氮含量影响不显著,在高质量分数下存在显著影响,并对土壤的硝化作用产生一定抑制作用,但在不同土壤类型中存在一定差异^[9];有研究认为氧四环素可能通过抑制土壤硝化微生物的活性而降低土壤的硝化作用^[27];也有研究认为 0~250 mg/L 氧四环素对污泥中的氮素硝化过程无明显影响^[28]。因此,关于四环素对土壤氮转化过程的影响并没有一致结论,后面还需要从土壤性质、抗生素浓度、温湿度、氮含量及氮转化微生物等诸多角度进行系统研究与阐述。

四环素残留一方面会通过影响土壤碳氮转化功能而间接影响作物养分吸收及生长,另一方面也会以直接的毒性效应对作物生长发育产生重要影响^[29]。当在土壤或水体中添加土霉素时,白菜种子发芽率总体呈下降趋势,而当添加金霉素时,其对白菜种子发芽没有显著的生态毒性效应^[30]。肖明月等以小白菜为受试生物的研究表明,在 0.5~5.0 mg/L 抗生素胁迫下,小白菜种子的发芽率无显著变化,随着抗生素暴露浓度的增加,小白菜种子的发芽率受到了显著抑制,抗生素暴

露浓度与小白菜根伸长抑制率之间具有良好的剂量-效应关系^[10]。安婧等的研究认为,土霉素对小麦种子出芽没有产生显著的影响^[31],这可能是由于种皮对土霉素溶液也具有一定的吸附功能,它在胚芽与污染环境中间架起了一道“保护屏障”,使种子正常发芽^[32]。而四环素类抗生素对不同作物毒性效应的研究结果并不一致,其影响可能取决于测试环境、受试植物类型及抗生素浓度等多种因素^[7,30,33]。本研究结果显示,低浓度四环素溶液(40 mg/L)对烟草种子发芽势与发芽率无显著影响,随着浓度升高,烟草种子发芽势与发芽率受影响程度随之增加。当四环素浓度为 160 mg/L 时显著降低了烟草种子发芽势与发芽率。

与发芽率相比,根生长受四环素的影响更敏感。四环素对根伸长抑制率的 IC₁₀、IC₅₀ 分别为 6.65、110.20 mg/L,四环素溶液浓度与烟草种子根伸长及根伸长抑制率均具有明显的剂量-效应关系。种子根部作为养分吸收器官,更容易感受到外源污染物的刺激或胁迫,作物根长被认为是对抗生素更为敏感的生态毒理指标^[33-34]。这可能是由于植物对环境中心生素的吸收主要通过根系,吸收的抗生素大部分被蓄积在根部,只有少量被转运至地上部^[34-37];Chen 等的研究也认为,有机化合物在相同浓度下对小麦幼苗根长的抑制效应大于其他参数^[38]。因此,根伸长抑制率可作为诊断抗生素对土壤及作物生态毒性的敏感性指标,及时反映土壤被四环素类抗生素污染的状况。此外,有研究发现,在添加 5~10 mg/L 氧四环素的水培试验中,不同作物的根系生长受到抑制作用,但在相同条件下的土培试验中却没有抑制作用^[39]。四环素在土培试验中比在水培试验中有更弱的抑制作用,一方面是因为土壤自身具有较强的缓冲性能和吸附能力^[40-42],另一方面可能是因为四环素类药物易与二价金属离子形成螯合物,从而降低了其在土壤中的有效含量^[43-44]。但要进一步明确四环素对烟草生长发育的毒性效应及其机制,尚需要不同环境下的模拟试验及对烟草生理生化过程的系统深入研究。

参考文献:

- [1] Richardson B J, Lam P K, Martin M. Emerging chemicals of concern: pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50(9): 913-920.
- [2] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
- [3] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment[J]. Chemosphere, 2006, 65(5): 725-759.
- [4] Aust M O, Godlinski F, Travis G R, et al. Distribution of sulfamethazine, chlortetracycline and tylosin in manure and soil of Canadian feedlots after subtherapeutic use in cattle[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 1243-1251.
- [5] Kools S A, Moltmann J F, Knacker T. Estimating the use of veterinary medicines in the European union[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 50(1): 59-65.
- [6] Golet E M, Strehler A, Alder A C, et al. Determination of fluoroquinolone antibacterial agents in sewage sludge and sludge -

- treated soil using accelerated solvent extraction followed by solid – phase extraction[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 74(21): 5455 – 5462.
- [7] Warman P R, Thomas R L. Chlortetracycline in soil amended with poultry manure[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1981, 61(1): 161 – 163.
- [8] 李伟明, 鲍艳宇, 周启星. 四环素类抗生素降解途径及其主要降解产物研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2300 – 2308.
- [9] 杨基峰, 应光国, 赖华杰, 等. 三种抗生素对土壤呼吸和硝化作用的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(6): 1050 – 1056.
- [10] 肖明月, 安 婧, 纪占华, 等. 六种常见抗生素对小白菜种子萌发及生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2775 – 2781.
- [11] 鲍艳宇, 周启星, 谢秀杰. 四环素类抗生素对小麦种子芽与根伸长的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(6): 566 – 570.
- [12] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 唐滢海, 刘郡英, 谷春豪, 等. 作物秸秆与城市污泥高温好氧堆肥产物对土壤氮矿化的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 326 – 331.
- [15] 顾春朝, 傅民杰, 孙宇贺, 等. 不同施肥措施对稻田土壤氮素矿化的影响[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(5): 43 – 48.
- [16] 周启星, 孔繁翔, 朱 琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 周启星, 王美娥. 土壤生态毒理学研究进展与展望[J]. *生态毒理学报*, 2006, 1(1): 1 – 11.
- [18] Malchair S, Camol M. Microbial biomass and C and N transformations in forest floors under European beech, sessile oak, Norway spruce and Douglas – fir at four temperate forest sites[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(4): 831 – 839.
- [19] Cao J, Wang C, Dou Z H, et al. Independent and combined effects of oxytetracycline and ntibiotic – resistant *Escherichia coli* O157: H7 on soil microbial activity and partial nitrification processes[J]. *Soil Biology & Biocmistrehy*, 2016, 98: 138 – 147.
- [20] Allison S D, Martiny J B. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2008, 105(S1): 11512 – 11519.
- [21] 金彩霞, 刘军军, 陈秋颖, 等. 兽药磺胺间甲氧嘧啶对土壤呼吸及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2): 314 – 318.
- [22] 刘 锋, 应光国, 周启星, 等. 抗生素类药物对土壤微生物呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(5): 1280 – 1285.
- [23] 王加龙, 刘坚真, 陈杖榴, 等. 恩诺沙星残留对土壤微生物数量及群落功能多样性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(1): 86 – 89.
- [24] 王金花, 朱鲁生, 王 军, 等. 4 种典型抗生素对土壤微生物呼吸的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2232 – 2236.
- [25] Toth J D, Feng Y C, Dou Z X. Veterinary antibiotics at environmentally relevant concentrations inhibit soil iron reduction and nitrification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(12): 2470 – 2472.
- [26] Gao M L, Song W H, Zhou Q, et al. Interactive effect of oxytetracycline and lead on soil enzymatic activity and microbial biomass[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2013, 36(2): 667 – 674.
- [27] Piotrowska – Seget Z, Engel R, Nowak E, et al. Successive soil treatment with captan or oxytetracycline affects non – target microorganisms [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2008, 24(12): 2843 – 2848.
- [28] Gomez J, Mendez R, Lema J M. The effect of antibiotics on nitrification processes[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1996, 57(1): 869 – 876.
- [29] 王 瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(9): 1705 – 1719.
- [30] 葛成军, 俞花美, 焦 鹏. 两种四环素类兽药抗生素对白菜种子发芽与根伸长抑制的毒性效应[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1143 – 1148.
- [31] 安 婧, 周启星, 刘维涛. 土霉素对小麦种子发芽与幼苗生长发育的生态毒性[J]. *环境科学*, 2009, 30(10): 3022 – 3027.
- [32] Araújo A F, Monteiro R R. Plant bioassays to assess toxicity of textile sludge compost[J]. *Scientia Agricola*, 2005, 62(3): 286 – 290.
- [33] 魏子艳, 王金花, 夏晓明, 等. 三种抗生素对蔬菜种子芽与根伸长的生态毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2): 237 – 242.
- [34] Migliore L, Godeas F, De Filippis S P, et al. Hormetic effect(s) of tetracyclines as environmental contaminant on *Zea mays* [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1): 129 – 134.
- [35] Herklotz P A, Gurung P, Vanden H B, et al. Uptake of human pharmaceuticals by plants grown under hydroponic conditions[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(11): 1416 – 1421.
- [36] 金彩霞, 陈秋颖, 刘军军, 等. 两种常用兽药对作物发芽的生态毒性效应[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 619 – 625.
- [37] 汤贝贝, 张振华, 卢 信, 等. 养殖废水中抗生素的植物修复研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(1): 224 – 232.
- [38] Chen Y, Zhou Q X. Ecological toxicity of reactive X – 3B red dye and cadmium acting on wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 14(1): 136 – 140.
- [39] Norman A G. Terramycin and plant growth 1 [J]. *Agronomy Journal*, 1955, 47(12): 585 – 587.
- [40] Figueroa R A, Mackay A A. Sorption of oxytetracycline to iron oxides and iron oxide – rich soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(17): 6664 – 6671.
- [41] Mackay A A, Canterbury B. Oxytetracycline sorption to organic matter by metal – bridging[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(6): 1964 – 1971.
- [42] Pils J R, Laird D A. Sorption of tetracycline and chlortetracycline on K – and Ca – saturated soil clays, humic substances, and clay – humic complexes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(6): 1928 – 1933.
- [43] 陈博阳, 余彬彬, 钱晓晴, 等. 锌和土霉素胁迫对玉米种子发芽和幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(1): 13 – 18.
- [44] 张劲强, 董元华, 安 琼, 等. 兽药抗生素在土壤环境中的行为[J]. *土壤*, 2005, 37(4): 353 – 361.