

含土霉素土壤添加不同基质后对玉米生理特性的影响

熊华烨¹, 秦俊梅¹, 马浩天²

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 为了解兽用抗生素污染对作物生长的潜在影响, 选择四环素类抗生素土霉素作为目标污染物, 通过玉米盆栽试验探讨含土霉素土壤(50 mg/kg)施用不同基质(菌剂、蚯蚓粪、生物质炭等单施及其配施菌肥)对玉米生育期生物量、光合参数和酶活性的影响。结果表明: 土霉素对玉米根的抑制作用大于植株, 菌糠(JK)、菌剂+蚯蚓粪(JQ)和菌剂+生物质炭(JS)处理比 OTC 处理的玉米根长和根干重分别提高 9.1%, 9.4%, 13.7% 和 66.46%, 183.4%, 46.72%; 不同基质处理可有效减少土霉素对玉米的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的抑制作用; 与 OTC 处理相比, 菌剂(JK)处理均能显著提高玉米 3 个时期的叶绿素含量, 幼苗期、拔节期和成熟期升幅依次为 7.78%, 33.33% 和 12.03%。成熟期菌剂+生物质炭(JS)处理比 OTC 处理分别提高玉米 CAT 活性 48% 和 POD 活性 43.2%; 幼苗期、拔节期和成熟期生物质炭(S)、菌剂+蚯蚓粪(JQ)和菌剂(JK)处理比 OTC 处理分别减少脯氨酸 59%, 16.5% 和 55.4%。总趋势为土霉素对玉米生长有明显抑制作用, 但添加不同基质均能不同程度缓解土霉素对玉米生理特性的影响, 菌糠(JK)、菌剂+生物质炭(JS)、生物质炭(S)和菌剂+蚯蚓粪(JQ)等处理优为明显。研究可为筛选减少抗生素对植物生长的基质提供理论依据, 也可为土霉素对农作物的风险评价提供科学意义。

关键词: 土霉素; 玉米; 不同基质; 生长

中图分类号: S144.1; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0283-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.042

Effects of Adding Different Substrates on Physiological Traits of Maize in a Oxytetracycline Contaminated Soil

XIONG Huaye¹, QIN Junmei¹, MA Haotian²

(1. College of Resources and Environment, National Experimental Teaching

Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University,

Taigu, Shanxi 030801; 2. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: A kind of tetracyclines-oxytetracycline was used as target pollutant to analyze the potential influences of veterinary antibiotics pollution on maize growth. A potted maize experiment was conducted to study the influences of oxytetracycline-contained soils on the biomass, photosynthesis parameters and antioxidant enzymes during the growth stage of maize in the soils with different substrates: microbial inoculants (JF) mushroom bran (JK), wormcast (QY), and biomass charcoal (S) etc. with the single and combined application. The results showed that oxytetracycline had a greater inhibiting effect on the roots of maize than on the aboveground. The length and dry weight of maize roots under the treatments of JK, microbial inoculants+ wormcast (JQ), microbial inoculants+ biomass charcoal (JS) increased by 9.1%, 9.4%, 13.7% and 66.46%, 183.4%, 46.72% respectively than the OTC treatment. The addition of substrates reduced the inhibiting effect of Oxytetracycline on the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of maize effectively. JK increased the chlorophyll contents in three stages of maize, the increases in seedling, jointing and maturation stages were 7.78%, 33.33% and 12.03% respectively. The CAT and POD activities under JS increased by about 48% and 43.2% than the OTC. The addition of S, JQ and JK reduced the proline contents by 59%, 16.5% and 55.4% respectively than the OTC in the seeding, jointing and maturation stages. In general, doxycycline had an obvious inhibiting effect on maize growth, but adding different substrates could alleviate the adverse effects on maize's physiological traits. The addition of JK,

收稿日期: 2017-10-13

资助项目: 山西省科技攻关项目(20140311008-4)

第一作者: 熊华烨(1993—), 男, 海南海口人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境污染研究。E-mail: 358096291@qq.com

通信作者: 秦俊梅(1974—), 女, 山西陵川人, 硕士, 副教授, 主要从事土壤环境污染研究。E-mail: sxaushr@163.com

JS, S and JQ had significant positive effect on maize's growth. These findings provided the theoretical basis for screening the substrates that could reduce antibiotics' influences on maize's growth, as well as for the assessment of oxytetracycline risk to crops.

Keywords: oxytetracycline; maize; different substrates; growth

抗生素被广泛应用在畜禽养殖方面,全世界几乎所有的国家都在畜禽饲料中添加抗生素来提高动物的品质和产量^[1]。在美国,每年抗生素的产量高达 22.7 万 t,其中 17.8%~70.0%用于畜禽养殖^[2]。由于抗生素的滥用带来了严重的残留问题,进入动物的抗生素仅有 20%被利用,其余 80%抗生素被排出体外^[3]。近 50 年来,已有研究表明,人们对抗生素的副作用及对人类健康的意识大大提高^[4],而土霉素极易在植物体内富集,并且通过食物链最终作用于人类,会对人类造成潜在的危害^[5-6]。长期存在于土壤中的抗生素会对植物产生毒害,而目前国内外已经展开了一系列关于土霉素对植物生理的研究^[7-9]。在吸收方式方面,有学者发现四环素类抗生素在植物体内的运输方式为被动运输或质外体运输^[10-11],并且发现土霉素会影响植物(如番茄、生菜等)的生长,产生氧化胁迫等^[12-13];廖德润等^[14]发现高浓度土霉素会抑制空心菜的叶绿素含量及抗氧化酶活性,并且当抗生素浓度>500 μg/L 时,空心菜体内的蛋白质含量会随之减少;安婧等^[15]发现土霉素能极显著抑制小麦种子芽长和根长,并能显著降低小麦的叶绿素、可溶性蛋白、超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性。

目前国内外已经展开关于土霉素污染对植物生理方面的研究,而对于生长周期长的作物玉米(*Zea mays* L.)的生理相关方面的探索却鲜见报道^[16],特别是关于降解土霉素的基质筛选方面缺少系统的深入研究。鉴于此,本文以玉米作为试验材料,通过外源添加土霉素探索不同基质(生物质炭、菌糠、蚯蚓粪和菌剂)处理对玉米生育期生物量、脯氨酸、抗氧化酶活性、叶绿素含量以及光合参数的影响,探索有效缓解土霉素对玉米生长影响的基质,有助于解析土霉素的污染机理及其在农业生态系统中可能造成的不良影响,为此类抗生素在畜禽养殖业中有效合理的使用提供一定的理论依据,也可对抗生素对玉米生长的生理毒性提供应用价值。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 土壤样本 供试土壤为石灰性褐土,采自山西省太谷县沙河村农田耕层(0—20 cm),土样风干后,分别过 1 mm 和 0.149 mm 筛网,充分混匀,分别进行土壤盆栽试验和土壤基本理化性质的测定。供试土壤的碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 30.76,16.53,227.8 mg/kg,全氮和有机质含量分别为 14.60,0.83 g/kg,pH 8.22,全盐量为 0.058 5%。供试土壤未检测出土霉素。

1.1.2 供试玉米 玉米品种为沃玉 963 号(生长期为 128 天),在种植前,用蒸馏水冲洗和浸泡 2~3 h,选取 10 颗大小一致的种子进行播种。

1.1.3 试验肥料及基质 盆栽所用化肥为复合肥,其配比浓度 N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15,施用量为 0.6 g/kg;土霉素购自华德农牧兽药批发店,纯度>98%;生物质炭和菌糠购自山西农业大学食用菌中心;菌剂购自山西省太谷县肥料公司(有效活菌数≥2×10⁸ 个/g);蚯蚓粪购自山东瓦力生物科技有限公司。生物质炭、菌糠和蚯蚓粪的养分含量见表 1。

表 1 供试肥料养分含量 单位:g/kg

肥料	全氮	全磷	全钾
生物质炭	8.54	12.11	24.99
蚯蚓粪	25.00	29.00	22.00
菌糠	12.59	3.28	13.52

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽方案 盆栽试验共设 9 个处理,土霉素和菌剂的添加量为 50 mg/kg,蚯蚓粪、生物质炭和菌糠的添加量均为 15 g/kg。各处理分别为:对照(CK)、添加土霉素(OTC)、添加土霉素+蚯蚓粪(QY)、添加土霉素+菌糠(JK)、添加土霉素+生物质炭(S)、添加土霉素+菌剂(JF)、添加土霉素+菌剂+蚯蚓粪(JQ)、添加土霉素+菌剂+菌糠(JJ)、添加土霉素+菌剂+生物质炭(JS),每个处理 4 次重复,以不添加土霉素的处理作为 CK 处理。盆栽采用底部内径 14 cm、上部内径 19 cm、高 25 cm 的塑料盆,每盆装土 10 kg,随机排列。将上述不同处理添加到过 1 mm 筛的石灰性褐土中混匀,平衡 24 h 后,再与过 2 mm 滤筛的褐土以及化肥混合均匀后装盆。文中单施包括 QY、JK、S、JF 处理,配施包括 JQ、JJ、JS 处理。

1.2.2 盆栽与采样 盆栽试验在山西农业大学资源环境学院大棚进行,2017 年 4 月 24 日播种,采用直播方式。5 月 16 号,3 叶期间苗,每盆保留 6 株;6 月 23 号,拔节期间苗,每盆保留 1 株。盆栽试验期采用蒸馏水浇灌(以不渗漏为准),人工防治虫害,不喷施农药。

9 月 11 日盆栽收割,用不锈钢剪刀从土面上将玉米剪断,将茎和叶分类装入信封。并将土倒出,小心尽量无损取出玉米根,然后依次用自来水、蒸馏水洗净后装于信封内,同时与玉米茎和叶放入烘箱,烘干后称重。

1.2.3 测定项目与方法 土霉素测定方法采用高效液相色谱法^[17];土壤理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[18];叶绿素含量采用 80%丙酮研磨法^[19]测定;脯氨酸含量(Proline)采用 3%磺基水杨酸浸提法^[19]

测定;过氧化氢酶活性(CAT)采用碘量滴定法^[19]测定,过氧化物酶(POD)活性采用 0.1%愈创木酚比色法^[19]测定;光和参数采用便携式光合仪 CI-310 测定,在晴朗天气的 9:00—11:00,测定各处理玉米完全展开的叶片净光合率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率,各处理 3 次重复。

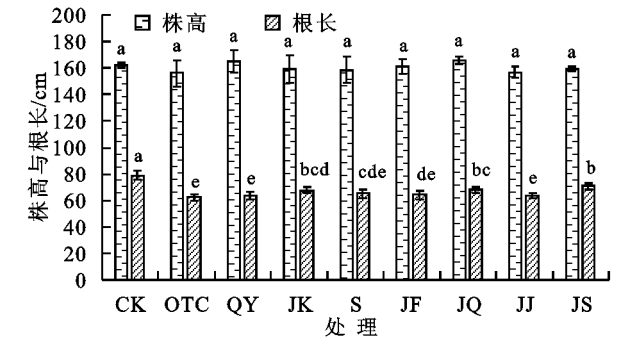
1.3 数据处理

所有数据均采用 DPS 7.0 软件进行单因素方差分析和 LSD 多重比较,进行玉米生育期生物量、叶绿素、光合参数、抗氧化酶活性及脯氨酸影响的显著性检验,显著水平为 $p<0.05$;采用 Excel 2016 进行统计绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米成熟期生长状况的影响

2.1.1 不同处理对玉米成熟期株高和根长的影响 从图 1 可看出,土霉素对玉米株高和根长均有一定程度的影响。玉米株高的 OTC 处理小于 CK,可见土霉素对玉米株高有抑制作用,而不同基质处理的株高均大于 OTC 处理,说明添加不同基质后可减少土霉素对玉米株高的影响,且各处理间差异均不显著($p<0.05$);玉米根长的 OTC 处理明显小于 CK,降幅为 21.4%,说明土霉素对玉米根长有明显的抑制作用($p<0.05$),这可能是因为土霉素在植物地下部分的富集率大于地上部分,这与迟荪琳等^[11]研究结果相似。不同基质处理的根长均大于 OTC 处理,其中 JK、JQ、JS 处理均显著大于 OTC 处理($p<0.05$),升幅分别为 9.1%、9.4%和 13.7%,这可能是因为不同基质配施下能缓解土霉素对玉米根的毒害作用。总体来看,土霉素对玉米根长的影响大于对其株高的影响,这与鲍陈燕等^[20]的研究结果相似。



注:图中不同小写字母表示不同处理间显著差异($p<0.05$)。下同。

图 1 不同处理对玉米成熟期株高和根长的影响

2.1.2 不同处理对玉米成熟期株干重和根干重的影响 从图 2 可看出,土霉素对玉米株干重和根干重有一定程度的影响。CK 大于 OTC 处理($p<0.05$),升幅为 36.2%,可见土霉素影响了玉米的株干重,玉米株干重 JK、S、JQ 和 JS 处理均显著大于 OTC 处理($p<0.05$),升幅分别为 15.4%、9.2%、43.9%和 17.8%,添加不

同基质后可减少土霉素对玉米地上部分干物质质量抑制的影响;OTC 小于 CK 处理($p<0.05$),降幅为 16.92%,可见土霉素可以影响玉米根干重,且 QY、JK、S、JF、JQ、JJ 和 JS 处理均显著大于 OTC($p<0.05$),升幅分别为 104.88%、66.46%、88.43%、63.10%、183.46%、77.66%和 46.72%,说明添加不同基质后可减少土霉素对玉米根干重的影响。总体可见,土霉素对玉米地上和地下部分的干物质积累量有抑制作用,在施入不同基质后均能一定程度上减少土霉素对玉米干物质积累量的影响,其中地下部分的升幅明显大于地上部分。

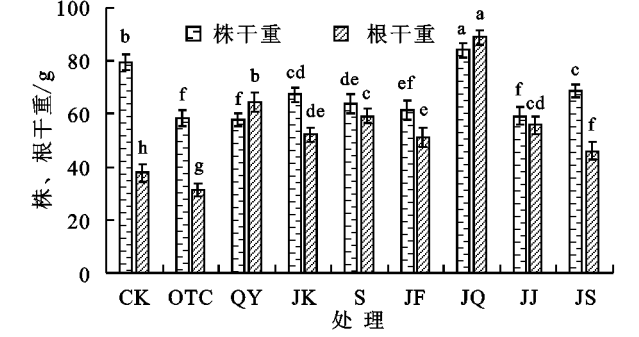


图 2 不同处理对玉米成熟期植株和根干重的影响

2.2 不同处理对玉米拔节期光合参数的影响

光合作用是植物最基本的生理反应,植物在逆境胁迫下都会直接或者间接地影响光合作用^[21]。由表 2 可知,OTC 处理中的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著小于 CK($p<0.05$),降幅为 37.1%、8.2%和 21.49%,且胞间 CO₂ 浓度显著大于 CK($p<0.05$),升幅为 3.14%,说明土霉素会抑制玉米的光合作用;不同基质处理的玉米净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著大于 OTC 处理($p<0.05$),说明不同基质均能在一定程度上缓解土霉素对玉米光合作用的抑制作用。其中,JK、S、JF 和 JS 处理的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著大于 CK($p<0.05$),其净光合速率与 CK 相比,增幅分别为 95.23%、88.13%、47.15%和 68.10%,说明这些基质不仅能缓解土霉素对玉米光合作用的抑制作用,还能显著提高玉米的光合作用。总趋势表现为玉米净光合速率、气孔导度、蒸腾速率分别与胞间 CO₂ 浓度成反比,而净光合速率、气孔导度、蒸腾速率三者之间成正比,这与前人的研究结果相似^[22]。

2.3 不同处理对玉米生育期叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,其含量的高低能客观反映植物抗逆性的强弱。由图 3 可看出,在玉米幼苗期和拔节期,OTC 处理的叶绿素含量低于 CK,降幅分别为 6.2%和 15.3%,但两者差异不显著,表明土霉素能够影响植物的光合作用,这与前人的研究成果相似^[10];在成熟期 OTC 处理的叶绿素

含量高于 CK,升幅为 24.14%,这可能是土壤本身具有吸附和降解土霉素的能力^[23],在幼苗期,叶绿素的含量为单施>配施,这可能是由于土壤中施入菌剂后,微生物在初期和玉米争夺养分,使得土壤肥力下降,进而影响玉米叶绿素的含量;在拔节期,JK、S、JS 处理分别与 OTC 处理差异显著($p<0.05$),升幅为 33.3%,35.2%和 25.7%;在成熟期,这种趋势与幼苗期相反。配施菌剂 JQ、JJ 和 JS 处理,在成熟期时

叶绿素含量均大于单施 QY、JK 和 S 处理,并且成熟期玉米叶绿素含量的规律为 JK>S>QY>JS>JQ。这可能是有益于玉米生长的微生物经过一段时间繁殖后,促进了土壤中速效养分的分解速度,从而提高了玉米叶绿素的含量。此外,菌剂和蚯蚓粪、菌糠、生物质炭配施后增加了土壤微生物的活性,可能对土壤中抗生素的降解有一定作用,且玉米叶绿素含量在生育期的规律表现为拔节期>成熟期>幼苗期。

表 2 不同处理对玉米光合参数的影响

处理	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
CK	8.59±1.06c	241.63±13.24c	1.21±0.07e	260.14±8.80b
OTC	5.40±0.97d	221.82±8.84d	0.95±0.07f	268.32±13.22a
QY	13.21±2.39b	252.12±12.82bc	1.23±0.03e	241.91±12.70e
JK	16.77±1.93a	270.85±11.53a	1.85±0.07a	227.88±12.75f
S	16.16±1.77a	269.54±14.53a	1.73±0.03b	231.91±9.39f
JF	12.64±1.25b	253.30±11.73b	1.31±0.05d	250.39±11.07cd
JQ	13.23±2.87b	255.66±11.42b	1.22±0.07e	243.32±11.74de
JJ	11.91±1.97b	250.33±10.43bc	1.21±0.07e	253.78±14.16bc
JS	14.44±2.10ab	260.02±12.15ab	1.45±0.13c	240.56±8.94e

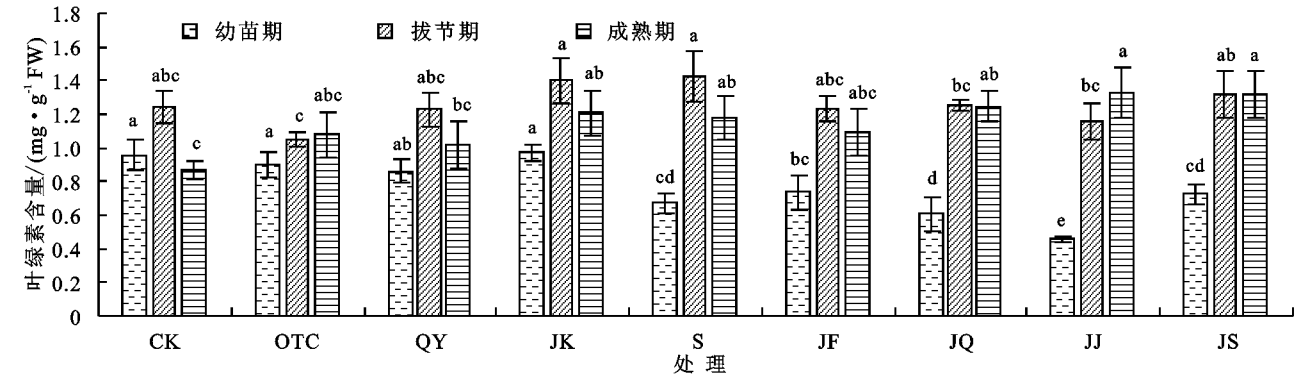


图 3 不同处理对玉米生育期叶绿素含量的影响

2.4 不同处理对玉米生育期酶活性的影响

2.4.1 不同处理玉米生育期过氧化氢酶(CAT)的影响 过氧化氢酶(CAT)是植物体内普遍存在的保护酶,CAT 可以清除植物体内多余的 H_2O_2 从而使细胞免遭受迫害。由图 4 可看出,在玉米幼苗期时 CAT 的活性表现为 CK 大于 OTC 处理,升幅为 17.7%,且差异显著($p<0.05$),表明土霉素会对玉米幼苗期的 CAT 活性产生了抑制作用,这与前人的研究结果一致^[12];而拔节期、成熟期与幼苗期相比趋势相反,且 OTC 处理大于 CK,这可能是由于土霉素随着时间的推移被土壤所吸附或降解,剩余的土霉素会促进植物产生更多的保护酶,即 CAT 的底物浓度增多,从而 CAT 活性增大^[12]。在玉米幼苗期时,各处理的 CAT 均与 OTC 处理差异性显著($p<0.05$);在成熟期时,QY 和 JS 处理均与 OTC 差异性显著($p<0.05$),升幅分别为 92%和 48%,可能是因为生物质炭本身具

有较大的比表面积,可以吸附土壤中的土霉素,从而使得玉米在成熟期遭受的危害较小,这与章明奎等^[24]的研究结果相似。而蚯蚓粪本身含有大量的有机质,有机质本身具有吸附和降解土壤中污染物的作用。另外,CAT 活性在玉米生育期的变化总体趋势为拔节期>成熟期>幼苗期。

2.4.2 不同处理对玉米生育期过氧化物酶(POD)的影响 过氧化物酶(POD)是植物重要的抗氧化酶之一,在植物遭受逆境过程中和过氧化氢酶一样起着重要保护作用。由图 5 可看出,在玉米的不同生育期时,POD 活性均为 OTC 处理大于 CK,且差异显著($p<0.05$),这可能是因为土霉素的加入刺激了植物产生过氧化物酶,即毒物兴奋作用。在玉米幼苗期,不同基质处理(QY、JK、S、JF、JQ、JJ 和 JS)均显著性小于 OTC 处理($p<0.05$),降幅分别为 39.87%,51.46%,32.53%,39.43%,28.17%,55.35%和

52.13%,说明不同基质的施入均能一定程度上缓解土霉素对玉米的毒害作用从而减少了 POD 活性的产生;在玉米拔节期时,QY 和 OTC 处理相比差异性显著($p<0.05$),QY 处理升幅为 14.10%;在成熟期时,以配施菌剂+生物质炭(JS)处理酶活性最高,并

且与 OTC 处理差异性显著($p<0.05$),JS 处理升幅为 43.20%,这可能是菌剂可以促进 POD 酶的合成来减轻玉米木质化程度。玉米生育期 POD 活性的变化趋势为成熟期>拔节期>幼苗期,这或与玉米生育期 CAT 酶活性恰好相反。

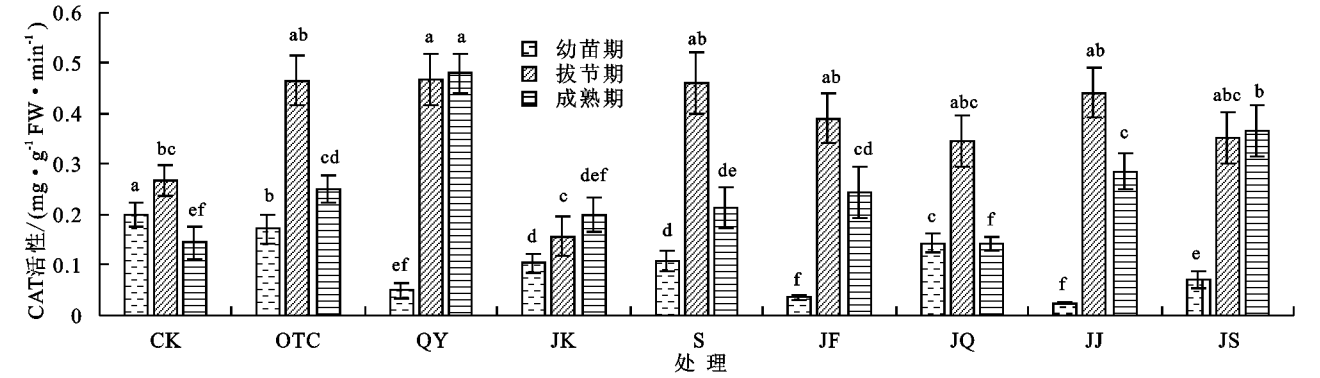


图 4 不同处理对玉米生育期过氧化氢酶的影响

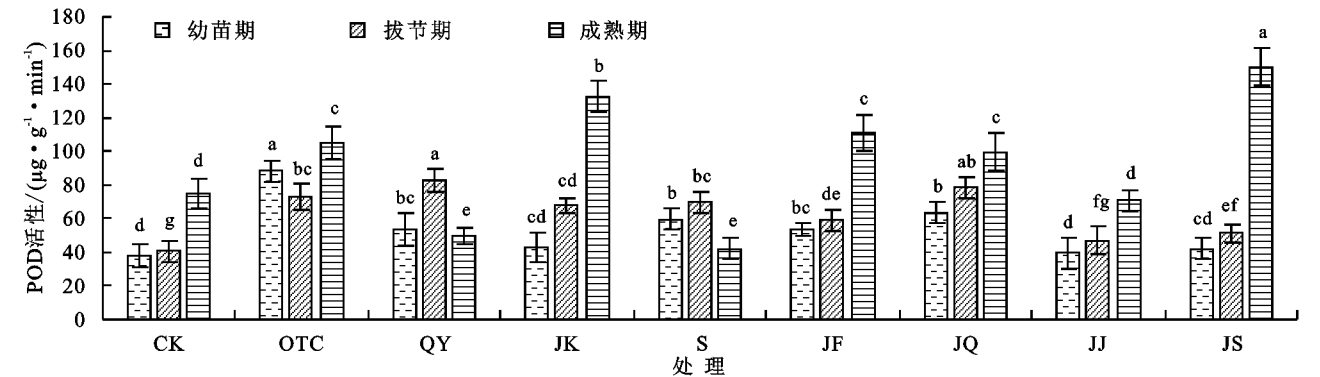


图 5 不同处理对玉米生育期过氧化物酶的影响

2.5 不同处理对玉米生育期脯氨酸含量的影响

植物在正常生长条件下,游离的脯氨酸含量很低,但是当植物遭受逆境胁迫时,脯氨酸含量会大大增加,因此,脯氨酸含量的高低可以客观地反映植物遭受胁迫的程度。由图 6 可看出,在玉米的不同生育时期脯氨酸含量均为 OTC 处理大于 CK,且差异显著,表明土霉素会刺激植物产生大量的脯氨酸,这与陈柳芳^[25]的研究结果一致。在幼苗期时,单施生物质炭(S)处理后的玉米脯氨酸含量最低,S 处理与 CK、OTC 处理分别达显著性水平($p<0.05$),降幅为 45.6%和 59.0%;在拔节期时,菌剂和蚯蚓粪

配施处理(JQ)配施时玉米的脯氨酸含量最低,JQ 与 OTC 处理相比达显著性水平($p<0.05$),JQ 处理降幅为 16.5%;在成熟期时,单施菌糠处理(JK)的玉米脯氨酸含量最低,JK 处理显著低于 OTC 与 CK 处理($p<0.05$),降幅分别为 55.4%和 47.9%。这可能是由于菌糠促进了 Ca²⁺、Mg²⁺等二价阳离子与 Na⁺的交换作用,降低了土壤碱化度,提高了土壤肥力和活性有机质^[26],并且在成熟期时 JQ 处理显著低于 OTC 与 CK 处理($p<0.05$),降幅分别为 37.8%和 27.4%。玉米生育期脯氨酸含量的变化趋势为拔节期>成熟期>幼苗期。

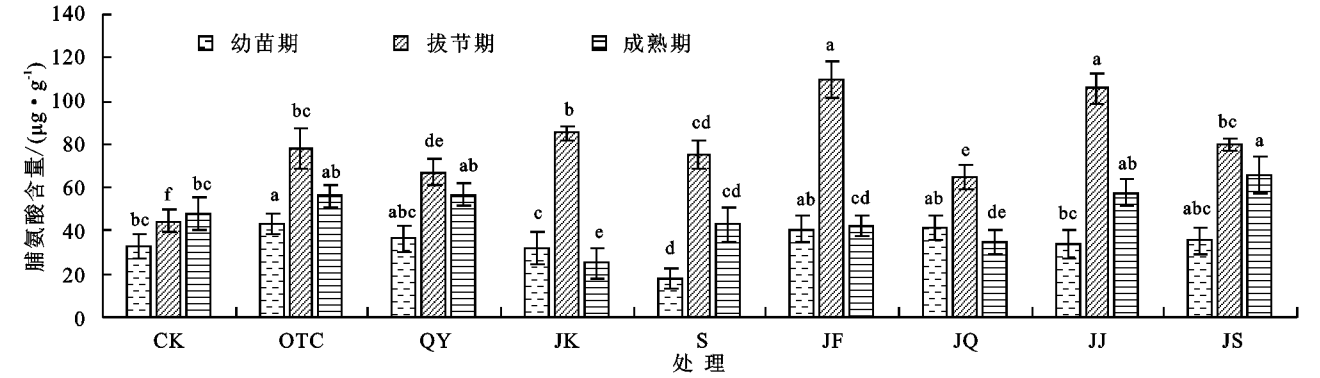


图 6 不同处理对玉米生育期脯氨酸含量的影响

3 讨论

选择玉米的生理指标进行土霉素胁迫下的生理毒性效应研究,结果发现土霉素对玉米根长的抑制作用明显大于株高,这可能是因为土霉素与核蛋白体的 30S 亚单位结合,从而阻止氨酰基-TRNA 同核糖核蛋白结合,从而抑制根部蛋白质的合成^[27],由于根系长出后最先接触的是土壤界面,所以不排除玉米根系上有类似的蛋白质分子。迟荪琳等^[11]研究结果也表明,土霉素在植物根部的富集率大于地上部分。玉米株干重 JK、S、JQ、JS 处理与根干重 QY、JK、S、JF、JQ、JJ、JS 处理均显著大于 OTC 处理,可知上述基质均能在不同程度上减少土霉素对玉米株干重和根干重的影响。其中,株干重 JQ 处理最为显著,而根干重 JF 处理最为显著,这可能是因为菌剂和蚯蚓粪配施提高了玉米可利用的养分,促进了玉米的生长。在玉米幼苗期和拔节期时,OTC 处理的叶绿素含量低于 CK,但在成熟期时 OTC 处理的叶绿素含量高于 CK,可能是成熟期土壤中残留的土霉素可以通过促进细胞内核酸和蛋白质的合成促进叶绿素的合成,同时通过降低细胞中叶绿素酶的活性延缓叶绿素的降解^[28],从而提高细胞中叶绿素的含量。在玉米光合参数影响方面,OTC 处理的玉米净光合速率、气孔导度、蒸腾速率相对于 CK 处理来说均有不同程度的降低,且胞间 CO₂ 浓度增加,这可能是因为土霉素能够影响光合电子传递速率以及光合色素的合成^[29]。有研究发现四环素类抗生素进入植物体内后会存在于气孔细胞中,也是其影响光合参数的可能原因之一^[10]。在不同基质处理下,菌糠(JK)处理下的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率最高,这可能是菌糠本身的特性促进了玉米的光合作用,从而也影响着玉米干物质的积累。

土霉素污染会对玉米 CAT 和 POD 的活性造成一定的影响。在玉米幼苗期时,CK 的 CAT 活性大于 OTC 处理,而到拔节期和成熟期 OTC 处理却大于 CK,这可能是因为当胁迫达到一定程度后植物会产生大量的过氧化物,从而使玉米产生不了过多的 CAT 酶来清除多余的 H₂O₂。但是 POD 活性在玉米 3 个生育期的规律均为 OTC 处理大于 CK,这可能是因为土霉素不能破坏玉米幼苗期的 POD 酶反应系统,从而刺激 POD 酶反应系统产生更多的 POD 活性;在玉米成熟期,菌剂+生物质炭(JS)配施的 CAT 活性和 POD 活性均显著性大于 OTC 处理,这有可能是因为菌剂和生物质炭有协同作用,不仅能增加土壤中的有效养分,促进玉米产生更多的酶活性,而且

还可以增加基质和土壤对土霉素的固定作用,从而缓解了土霉素的毒害作用。另外 CAT 活性在玉米生育期的变化总体趋势为拔节期>成熟期>幼苗期,而 POD 活性却为成熟期>拔节期>幼苗期,这与王丽娜^[30]的研究结果一致,造成这一现象的主要原因可能是与玉米营养生长和呼吸作用强度有关。

本研究证实了土霉素会刺激玉米产生大量的脯氨酸,脯氨酸作为一种细胞质渗透调节物质降低细胞酸度和维持细胞氧化还原势。在不同基质处理下,玉米不同生育期各基质处理间的脯氨酸含量出现不同规律。在幼苗期、拔节期和成熟期时,以施入生物质炭(S)、菌剂+蚯蚓粪(JQ)和菌糠(JK)处理的玉米,其脯氨酸含量最低,原因可能是由于 JQ 和 JK 处理增加了玉米蛋白质的含量,从而降低了脯氨酸的积累,但是这种机理有待进一步研究。

4 结论

(1)玉米根长、株干重和根干重显著受到土霉素抑制,并且土霉素对玉米根长的抑制作用明显大于株高。通过施入不同基质均能不同程度上促进玉米根长、株干重和根干重,其中 JK、JQ 和 JS 处理效果最佳。

(2)土霉素会显著抑制玉米的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,其中 JK、S、JF 和 JS 处理效果最好;在玉米幼苗期和拔节期,OTC 处理的叶绿素含量均低于 CK 处理,降幅分别为 6.2% 和 15.3%,在成熟期 OTC 处理的叶绿素含量大于 CK 处理,升幅为 24.14%;与 OTC 处理相比,所有处理中 JK 处理均能显著提高玉米 3 个时期的叶绿素含量,升幅依次为 7.78%,33.33% 和 12.03%。

(3)在玉米幼苗期,各基质处理的 CAT 和 POD 活性均小于 OTC 处理,且差异显著,成熟期 JS 处理与 CK 处理相比,分别提高 CAT 活性 48% 和 POD 活性 43.2%;土霉素显著提高了玉米生育期脯氨酸含量,施入不同基质均能在不同程度上减少玉米脯氨酸含量;与 OTC 处理相比,玉米幼苗期、拔节期和成熟期分别以 S、JQ 和 JK 处理降幅最为显著,依次为 59.0%,16.5% 和 55.4%。

(4)玉米 CAT 活性和脯氨酸变化规律为拔节期>成熟期>幼苗期;POD 活性变化规律趋势为成熟期>拔节期>幼苗期。

(5)所有基质均能不同程度缓解土霉素对玉米生理特性的影响,其中 JK、JS、S 和 JQ 处理效果最显著。

参考文献:

- [1] 闫雷,毕世欣,赵启慧,等.土霉素及镉污染对土壤呼吸及酶活性的影响[J].水土保持通报,2014,34(6):101-108.

- [2] Mathew A G, Cissell R, Liamthong S. Antibiotic resistance in bacteria associated with food animals: A United States perspective of livestock production [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2007, 4(2): 115-133.
- [3] Liu F, Ying G G, Yang L H, et al. Terrestrial ecotoxicological effects of the antimicrobial agent triclosan [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(1): 86-92.
- [4] Xue B, Zhang R, Wang Y, et al. Antibiotic contamination in a typical developing city in south China: Occurrence and ecological risks in the Yongjiang River impacted by tributary discharge and anthropogenic activities [J]. Ecotoxicology and Environment Safety, 2013, 92(3): 229-236.
- [5] Marti R, Scott A, Tien Y C, et al. Impact of manure fertilization on the abundance of antibiotic-resistant bacteria and frequency of detection of antibiotic resistance genes in soil and on vegetables at harvest [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(18): 5701-5709.
- [6] Blackwell P A, Kay P, Ashauer R, et al. Effects of agricultural conditions on the leaching behaviour of veterinary antibiotics in soils [J]. Chemosphere, 2009, 75(1): 13-19.
- [7] Vilvert E, Contardo-Jara V, Esterhuizen-Londt M, et al. The effect of oxytetracycline on physiological and enzymatic defense responses in aquatic plant species *Egeria densa*, *Azolla caroliniana*, and *Taxiphyllum barbieri* [J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 2016, 99(1): 104-116.
- [8] Ma T, Chen L k, Wu L, et al. Toxicity of OTC to *Ipomoea aquatica* Forsk. and to microorganisms in a long-term sewage-irrigated farmland soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(15): 15101-15110.
- [9] Boonsaner M, Hawker D W. Investigation of the mechanism of uptake and accumulation of zwitterionic tetracyclines by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 78(2): 142-147.
- [10] Di M G, Gismondi A, Canuti L, et al. Tetracycline accumulates in *Iberis sempervirens* L. through apoplastic transport inducing oxidative stress and growth inhibition [J]. Plant Biology, 2014, 16(4): 792-800.
- [11] 迟荪琳, 王卫中, 徐卫红, 等. 四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 [J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1-12.
- [12] 崔馨, 乔显亮, 韩成伟, 等. 生菜对土霉素的吸收及其植物毒性 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1038-1042.
- [13] 俞清香. 土霉素对番茄根系生长和细胞分裂的影响及其生理机制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [14] 廖德润, 刘超翔, 王振, 等. 兽用抗生素胁迫对空心菜的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2558-2564.
- [15] 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.
- [16] 王朋, 温蓓, 张淑贞. 诺氟沙星对芽期玉米的毒性和氧化损伤研究 [J]. 生态毒理学报, 2010, 5(6): 849-856.
- [17] 范菲菲, 李兆君, 龙健, 等. 土壤中土霉素残留的高效液相色谱检测方法 [J]. 核农学报, 2010, 24(6): 1262-1268.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-188.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 218-228.
- [20] 鲍陈燕, 顾国平, 章明奎. 兽用抗生素胁迫对水芹生长及其抗生素积累的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 164-172.
- [21] 王芳, 李永生, 王汉宁, 等. 钙对铅胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 202-207.
- [22] 张继旭, 申国明, 孔凡玉, 等. 四环素对烤烟生长发育及光合作用的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 48-56.
- [23] 鲍艳宇. 四环素类抗生素在土壤中的环境行为及生态毒性研究 [D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [24] 章明奎, 顾国平, 徐秋桐. 生物质炭降低蔬菜吸收土壤中抗生素的作用 [J]. 农学学报, 2016, 6(1): 42-46.
- [25] 陈柳芳. 三种喹诺酮类抗生素对斜生栅藻的毒性效应 [D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [26] 申进文, 沈阿林, 张玉亭, 等. 平菇栽培废料等有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 631-636.
- [27] Kohanski M A, Dwyer D J, Collins J J. How antibiotics kill bacteria: From targets to networks [J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(6): 423-435.
- [28] 周文礼, 乔秀亭, 肖慧, 等. 3 种抗生素对几种海洋微藻叶绿素 a 含量影响的初步研究 [J]. 海洋环境科学, 2009, 28(3): 268-271.
- [29] Opreş O, Copaciu F, Soran M L, et al. Influence of nine antibiotics on key secondary metabolites and physiological characteristics in *Triticum aestivum*: Leaf volatiles as a promising new tool to assess toxicity [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 87(1): 70-79.
- [30] 王丽娜. 镍胁迫对玉米生理特性、氮磷钾营养元素吸收和产量的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.