

金属胁迫下沼肥对玉米发芽和苗期生长的影响

曹宇东, 阴美晓, 郑磊, 田永兰*, 张化永

华北电力大学工程生态学与非线性科学研究中心, 北京

Email: yonglantian@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月8日; 录用日期: 2021年4月9日; 发布日期: 2021年4月16日

摘要

土壤里的金属污染经过植物富集和厌氧发酵聚集在沼肥之中而影响沼肥的品质。本文探究了不同类型的金属污染沼肥对玉米发芽和苗期生长的影响。结果表明: 1) 金属污染的沼液显著抑制玉米种子的发芽过程, 并且对种子的生物量积累也有较明显的抑制作用。复合金属污染对种子萌发的抑制作用相较于单一金属可能更强烈, 且存在显著性差异($p < 0.05$)。部分金属添加在一定程度上也促进种子的发芽, T3 (Ni) 组的活力指数较T0提高54.16%, T4 (Cu) 组的发芽指数较T0组提高44.23%。2) 施用沼渣肥可促进玉米幼苗生长和生物量积累, 但大部分金属污染则会造成抑制作用, 且对茎叶的抑制作用比对根的更强。T2 (Co) 组对株高的抑制作用最大, T3 (Ni) 组的生物量积累受到的抑制相对较大, 仅T4 (Cu) 组对株高有促进作用。本研究结果通过探究金属污染沼肥对植物生长的作用, 为沼肥生产、农业利用和环境保护提供了理论依据。

关键词

金属污染, 沼液浸种, 沼渣施肥, 发芽指数

Effect of Biogas Fertilizers on Seed Germination and Growth of Maize under Metal Stress

Yudong Cao, Meixiao Yin, Lei Zheng, Yonglan Tian*, Huayong Zhang

Research Center for Engineering Ecology and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing

Email: yonglantian@ncepu.edu.cn

Received: Mar. 8th, 2021; accepted: Apr. 9th, 2021; published: Apr. 16th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 曹宇东, 阴美晓, 郑磊, 田永兰, 张化永. 金属胁迫下沼肥对玉米发芽和苗期生长的影响[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(2): 252-260. DOI: [10.12677/aep.2021.112026](https://doi.org/10.12677/aep.2021.112026)

Abstract

Metal pollution in the soil was accumulated in the biogas fertilizer through plant enrichment and anaerobic fermentation, which affected the quality of biogas fertilizer. This article explored the effects of different types of metal-contaminated biogas fertilizers on the germination and seedling growth of maize. The results showed that: 1) The metal-contaminated biogas slurry significantly inhibited the germination process and biomass accumulation of seeds. The inhibitory effect of composite metal pollution on seed germination was stronger than that of single metal, significantly ($p < 0.05$). Some of the metal addition promoted the germination of seeds. The vitality index of Group T3 (Ni) was 54.16% higher than that of the T0, and the germination index of Group T4 (Cu) was 44.23% higher than that of Group T0. 2) The application of biogas residue fertilizer promoted the growth and biomass accumulation of maize seedlings. Most metal pollution caused inhibition on the growth of seedlings. The inhibition on stems and leaves was stronger than that on roots. The inhibitory effect of Group T2 (Co) on plant height was stronger than others. The inhibition of biomass accumulation of Group T3 (Ni) was weaker than others. Only Group T4 (Cu) promoted the height of plant. The results of this study provided a theoretical basis for biogas fertilizer production, agricultural utilization and environmental protection by exploring the effects of metal-contaminated biogas fertilizer on plant growth.

Keywords

Metal Pollution, Seed Soaking in Biogas Slurry, Fertilizing with Biogas Residue, Germination Index

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国农田土壤重金属污染日益严重, 环境质量明显下降, 对农产品及相关产业安全带来巨大威胁, 其中 Ni、Cu 和 Zn 分别超标 4.8%、2.1% 和 0.9% [1]。在矿区附近的土壤污染情况则更为严重[2]。而将被重金属污染的生物质用作厌氧发酵是一种经济高效的处理方法[3] [4]。厌氧发酵生产制得的沼肥是一种营养成分丰富的有机肥, 以往的许多研究也证明了施加沼肥可以促进作物、果树等的生长发育[5] [6] [7]。然而, 生物质含有的重金属会在发酵之后富集到沼液和沼渣之中[8], 影响沼肥的施用。

部分重金属既是生物生长所必需的元素, 又是抑制生物生长的物质。Cu、Zn、Fe 对种子生长主要表现为抑制作用, 仅在较低浓度下对种子发芽有一定促进作用, 一般情况下浓度都不超过 100 mg/L。黎建玲等[9]人的研究显示在不同浓度 Cu 的胁迫下, 南瓜种子萌发参数呈现出先升高后降低的趋势, 过量的 Cu 制约了植物的生长发育。陈丽丽等[10]的研究显示当 Zn 的浓度大于 50 mg/L 时小麦种子的活力指数均小于对照组。郑爱珍的研究也表明当 Cu、Zn 的浓度大于 50 mg/L 时, 玉米种子的萌发即受到抑制[11]。此外, 另有研究显示在 Cu、Zn 复合胁迫下, 包菜种子的各项发芽数据均显著低于对照组[12]。薛建福等[13]的研究发现较高浓度($Fe \geq 400$ mg/L)时, 浸种对叶绿素 a 和叶绿素 b 含量有一定抑制作用。含有 Ni 的培养液对种子的刺激较大。当 Ni 的浓度大于 1.5 mg/L 时, 含 Ni 培养液即对水稻和白菜种子表现为抑制作用[14]。Co 并非生物生长的必须元素, 即使浓度低为 0.03 mmol/L, 水稻种子也表现为抑制状态[15]。

李黎等的研究表明随着浓度提高, 玉米种子的发芽率、发芽势均下降, 且玉米种子相对其他植物对 Co 的富集相对较少[16]。

当前我国许多地方的畜禽养殖场在饲养过程中使用了大量含有 Cu、Zn 等的微量元素[17], 且农田重金属污染情况严重, 产出的沼肥也因此被重金属所污染。因此, 研究重金属胁迫下沼肥对植物的生长发育已刻不容缓。以往的实验往往都是单一的添加金属盐溶液或培养液[12] [13] [16], 关于利用沼液浸种和沼渣施肥条件下金属胁迫影响的相关研究还较少。该研究以更贴近实际的研究方法, 提供相对更接近现实的参考资料。

本研究分析了不同金属胁迫条件下的沼肥对植物生长的影响, 以减少盲目施用沼肥造成的作物、果树等减产, 减少沼肥的滥用造成的土壤重金属污染。本研究以牛粪作为接种物, 矿区的污染紫花苜蓿作为底物, 在不同组添加不同种类金属进行厌氧发酵制得含有不同金属的沼肥。以北方常见的粮食作物玉米的种子进行发芽和苗期发育实验。通过对沼液浸种、施加沼肥后玉米的发芽率、活力指数等的研究, 旨在了解不同金属胁迫下植物的生长过程的影响, 为今后规范厌氧发酵、有机肥生产提供相应的参考依据, 为减轻植物和土壤的重金属污染提供数据支持。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

厌氧发酵底物苜蓿草采自河北张家口某废弃铁矿。采得的苜蓿草在实验室风干后磨成粉末, 并过 60 目标准土壤筛。接种物为张家口某奶牛场的储备牛牛粪, 采回后置于 4℃冰箱备用。各金属盐试剂均为分析纯。

实验种子为山东富易公司购得的玉米(*Zea mays* L.)种子郑单 958。选取颗粒饱满、大小均一、健康无病等各项指标良好的种子, 用去离子水清洗酒精消毒后备用。营养土自北京某花鸟市场购得, 于阴凉避光处存放。

2.2. 实验方法

本实验以苜蓿草和牛粪(1:2)作为原料进行厌氧发酵。T0 组不添加额外金属, T1~T9 组分别添加不同种类金属模拟各种金属污染, 各组具体添加的金属及含量如表 1 所示。发酵反应在中温条件下(37.0 ± 1.0℃)进行。发酵罐有效容积为 300 mL, 发酵体系总固体浓度为 8%。发酵周期 32 天, 每天测定产气量以确保发酵体系的稳定。制得的沼肥在 8000 r/min 下离心 5 min, 分离得到沼液和沼渣以供后续实验使用。

2.2.1. 沼液实验

去离子水(CK)浸种作为对照, 将玉米种子在稀释一倍的各组(T0~T9)沼液中浸种 18 h。取出洗净后置于恒温恒湿培养箱(HWS-160, 宁波江南仪器厂)中培养 7 天, 每个培养皿中盛放 20 粒种子, 每组 3 个重复。培养箱设定条件为 25.0℃ ± 1.0℃, 相对湿度 60% ± 5%, 遮蔽光照。每天补充适量去离子水, 并记录各组种子的发芽数(胚芽长至种子的一半长度即视为发芽)。培养 7 天后分别测量种子的胚芽、胚根的长度和重量[18]。种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数[19]依据如下公式计算:

$$\text{发芽率} = (\text{前 7 天发芽的种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势} = (\text{前 3 天发芽的种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数 GI} = \sum \frac{Gt}{Dt} \quad (Gt \text{ 为第 } t \text{ 日种子发芽数, } Dt \text{ 为发芽天数}) \quad (3)$$

$$\text{活力指数} = \text{苗长度} \times \text{发芽指数} \quad (4)$$

2.2.2. 沼渣实验

以纯营养土作为对照(CK), 将各组沼渣(T0~T9)与营养土以 1:9 的比例混合均匀置于盆中静置 1 天。每盆土壤中播种 5 粒玉米种子, 覆土 4 cm 左右。在光照培养箱(GXZ-300B, 宁波江南仪器厂)培养 14 天, 早晚浇水保持土壤湿润。培养箱温度设定为 $27.0^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 光照条件为 12 h 光照 12 h 黑暗。于第 7 天统计玉米发芽数, 保留长势正常的一株继续培养。第 14 天测量各株玉米的株高, 根茎叶的鲜重和干重。

Table 1. The additions contents of biogas fertilizer (mg)

表 1. 各组沼肥的金属添加组成和含量(mg)

组别	原料和干重	ZnCl ₂	CoCl ₂ ·6H ₂ O	NiCl ₂ ·6H ₂ O	CuCl ₂ ·2H ₂ O
T0	无	—	—	—	—
T1	Zn	1.25	—	—	—
T2	Co	—	1.21	—	—
T3	Ni	—	—	2.52	—
T4	Cu	—	—	—	8.06
T5	Co + Zn	1.25	1.21	—	—
T6	Co + Ni	—	1.21	2.52	—
T7	Co + Cu	—	1.21	—	8.06
T8	Co + Zn + Ni	1.25	1.21	2.52	—
T9	Co + Zn + Ni + Cu	1.25	1.21	2.52	8.06
最终浓度	2.0 mg/L Zn	1.0 mg/L Co	2.0 mg/L Ni	10.0 mg/L Cu	

2.3. 统计方法

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件进行数据的处理分析, 用 Origin 软件进行图片的绘制, 邓肯氏新复极差法(DMRT) ($p = 0.05$)进行统计[20]。

3. 结果与分析

3.1. 沼液浸种的影响

如表 2 所示, 对照组 CK 的发芽势为 $53.33\% \pm 5.44\%$, 发芽率为 $61.67\% \pm 6.80\%$, 发芽指数为 16.06 ± 1.16 , 活力指数为 136.00 ± 9.97 。而使用沼液浸种的实验组在这几个参数上均低于对照组, T0 组比 CK 组的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数分别低 56.25%、18.92%、49.72%和 58.03%。且在发芽势、发芽指数和活力指数上与实验组存在着显著性差异($p < 0.05$), 金属污染可能是造成沼液浸种抑制的原因。而额外的金属可一定程度的减少这种抑制现象。其中 Ni 和 Cu 的危害性比 Zn 和 Co 的较小。T3 组的活力指数较 T0 提高 54.16%, 与 CK 组不存在显著性差异; T4 组的发芽指数较 T0 组提高 44.23%, 高于 T1、T2 组且与 T8、T9 组存在显著性差异($p < 0.05$)。金属污染抑制种子发芽最严重的为 T8 和 T9 组。T8 组的发芽势较 T0 组减少 36.67%, 与 T1~T4 组存在显著性差异($p < 0.05$); 发芽指数和活力指数分别为减少 44.06%和 68.70%, 与 T3、T4 组也存在显著性差异($p < 0.05$)。仅有 T8、T9 组在发芽率上与 CK 组存在显著性差异($p < 0.05$)。综上所述, 复合金属污染对种子萌发的抑制作用相较于单一金属可能更强烈, 危害性也更大。

Table 2. Effects of biogas slurry on germination of maize seeds**表 2.** 沼液对玉米种子发芽的影响

组别	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数	活力指数
CK	53.33 ± 5.44a	61.67 ± 6.80a	16.06 ± 1.16a	136.00 ± 9.97a
T0	23.33 ± 3.60b	50.00 ± 2.36ab	8.07 ± 0.57bcd	57.07 ± 15.30bc
T1	26.67 ± 4.91b	45.00 ± 2.36ab	8.48 ± 1.44bcd	62.51 ± 18.80bc
T2	28.33 ± 3.60b	41.67 ± 7.58ab	8.32 ± 0.96bcd	49.46 ± 2.82bc
T3	30.00 ± 6.24b	46.67 ± 5.93ab	10.67 ± 1.22bc	87.98 ± 28.53ab
T4	35.00 ± 6.24b	55.00 ± 8.50ab	11.64 ± 2.17b	79.29 ± 13.58b
T5	28.33 ± 1.36b	48.33 ± 3.60ab	9.45 ± 0.65bc	77.03 ± 12.07b
T6	26.67 ± 1.36b	38.33 ± 2.72ab	8.65 ± 0.50bcd	66.65 ± 13.85bc
T7	21.67 ± 3.60bc	41.67 ± 7.20ab	7.59 ± 1.08bcd	42.63 ± 6.17bc
T8	6.67 ± 1.36c	31.67 ± 5.93b	4.52 ± 0.96d	17.86 ± 4.48c
T9	18.33 ± 3.60bc	35.00 ± 6.24b	6.14 ± 0.52cd	30.83 ± 9.77bc

注：表中数据为平均数 ± 标准误差。同列不同字母表示经邓肯氏新复极差法检验在 $p < 0.05$ 水平差异显著。

未额外添加金属的 T0 组的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数较对照组 CK 分别下降 56.26%、18.92%、49.75 和 58.03。从矿区收获的首蓿草自身从土壤中吸收了大量金属，经折算在厌氧发酵体系中，Fe 的浓度为 53.33 mg/L。有实验结果表明在该浓度下，种子的发芽势、发芽率和发芽指数均受到抑制作用[13]。另一方面，沼液浓度过高也可能是导致 T0 组发芽率较低的原因之一，史向远等[21]的研究显示，当沼液的浓度大于 50% 时，西瓜种子的发芽即会受到显著的抑制，其在 50% 浓度的发芽率与本文相类似。当沼液的浓度超过种子所能承受的阈值，细胞膜受到严重的盐胁迫，就会造成种子的缺水，影响种子的生长发育。

如图 1 所示，用金属污染的沼液浸种对玉米幼苗的生长有一定的抑制作用，对照组 CK 的芽长和根长分别为 3.35 ± 0.21 cm 和 5.42 ± 0.34 cm。T0 组的芽长和根长较 CK 组分别降低 13.13% 和 28.78%。T5 组的芽长的促进作用最大，较 T0 提高 22.07%；T3 组对根长的促进作用最大，较 T0 组提高 20.73%。而 T8 组对玉米芽和根的生长抑制最大，较 T0 组分别降低 28.87% 和 39.11%；其次为 T9 组，分别降低 18.56% 和 38.6%。

图 2 为沼液种类对玉米生物量的影响。从图中可以看出金属污染沼液浸种对玉米幼苗的芽和根的生物量都有抑制作用。对照组 CK 的芽重和根重分别为 0.14 ± 0.01 g 和 0.10 ± 0.02 g，T0 组较 CK 分别降低 20.69% 和 41.16%。对于芽重，T3~T6 组较 T0 组均有一定促进作用，但是不明显。T2 组的抑制作用最明显，较 T0 组降低 26.34%。在根重上，T3 组的促进作用最大，较 T0 组提升 41.45%；T8 组的抑制作用最强，降低 56.61%。

在本沼液浸种实验中，金属污染的沼液抑制了种子的发芽和生长，但适当的添加额外金属可适当缓解这种抑制作用。王彦杰等[22]的研究指出，在高浓度下，谷子种子在 24~48 h 内的相对电导率下降的程度较小，表明高浓度的沼液抑制谷子种子发芽过程中细胞膜修复过程，且随着浓度增大而增强。通过添加 Ni 和 Cu，一定程度上提高了种子的活力指数。而添加 Co 则对种子发芽和生物量积累有较大的抑制作用，一方面 Co 并非是植物生长的必须元素，另一方面，Co 盐也增加了沼液的渗透压，增加了对种子的胁迫程度。而 Co 与部分其他金属的联用并未降低种子发芽率可能是金属共沉淀或其他因素导致的[23]。在本实验的条件基础上，通过优化沼液浸种浓度以及金属添加量，种子的发芽状况还有进一步的提升空间。

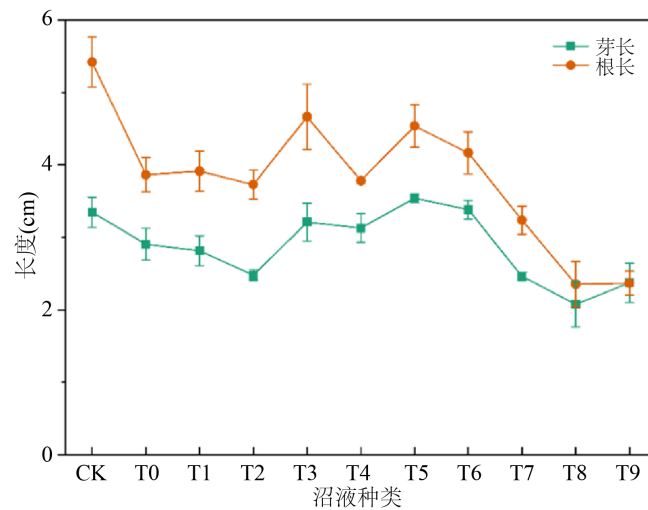


Figure 1. Effects of biogas slurry on the growth of maize seedlings
图 1. 沼液对玉米幼苗生长的影响

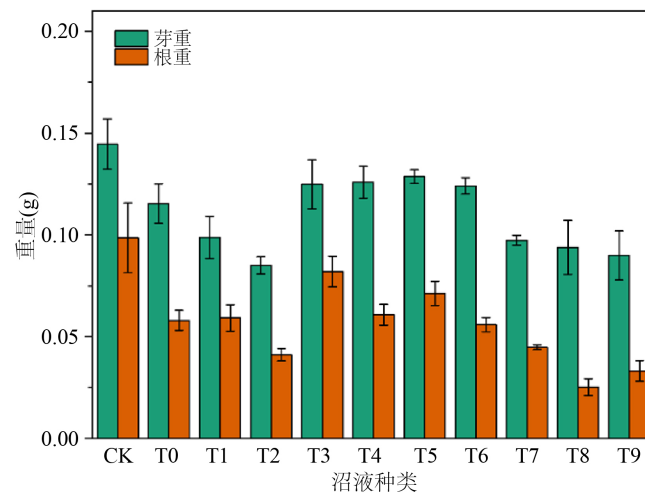


Figure 2. Effect of biogas slurry type on maize biomass
图 2. 沼液种类对玉米生物量的影响

3.2. 沼渣施肥的影响

沼渣肥是一种多元的复合型有机肥，施加沼渣肥能有效降低土壤容重，提高有机质含量和速效养分含量[24]。如图 3 所示，施加金属污染的沼肥并未引起发芽率的显著性下降，都维持在 90% 以上，仅 T4 和 T5 组的发芽率为 86.67%。

图 4 则表示了沼渣对玉米幼苗生长的影响。从图中可以看出施加沼肥均促进了玉米幼苗的生长。经过 14 天的生长周期，玉米幼苗都长出三片叶子，对照组 CK 的株高为 34.09 ± 0.95 cm。T0 组的株高比 CK 组提升 8.86%。T4 组添加 Cu 对种子萌发有促进作用，较 T0 组提升 2.60%。其余组均低于 T0 组为抑制作用。其中 T2 组的抑制作用最大，较 T0 组降低 7.36%。表明施用含 Cu 的沼渣肥可促进玉米幼苗的拔高，而施用含有 Co 的沼渣肥会抑制拔高。

施加沼肥的玉米幼苗的生物量除根的干重均大于对照 CK，但未到达显著性水平，各组根的干重没有较大差别(表 3)。对照组 CK 的茎叶鲜重、根鲜重、茎叶干重、根干重分别为 1.63 ± 0.15 g、 0.66 ± 0.04 g、

0.12 ± 0.01 g 和 0.06 ± 0.00 g, 而 T0 组相较于 CK 组分别增加了 30.84%、8.78%、25.01% 和 -8.72%。额外的金属污染主要对玉米幼苗的生长起抑制作用, 且对茎叶的抑制作用比对根的更强。T2 组受到的抑制相对较低, 茎叶鲜重和干重相对 T0 组分别减少 6.29% 和 4.58%, 而根的鲜重和干重则分别增加 21.21% 和 7.67%。T3 组受到的抑制相对较大, 茎叶鲜重和干重相对 T0 组分别减少 25.03% 和 16.03%。

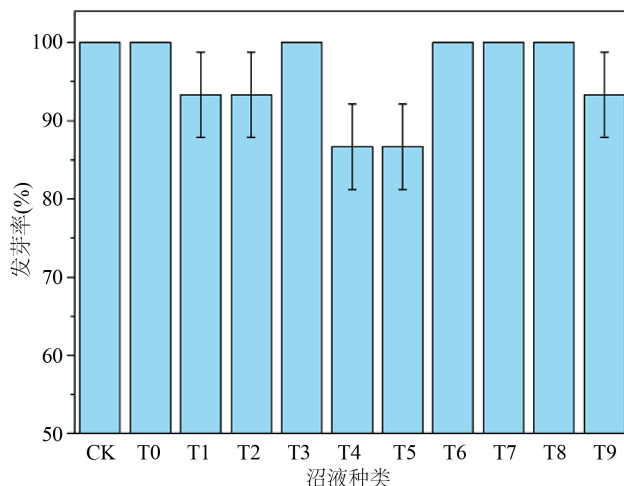


Figure 3. Effect of biogas residue on germination rate of maize

图 3. 沼渣对玉米发芽率的影响

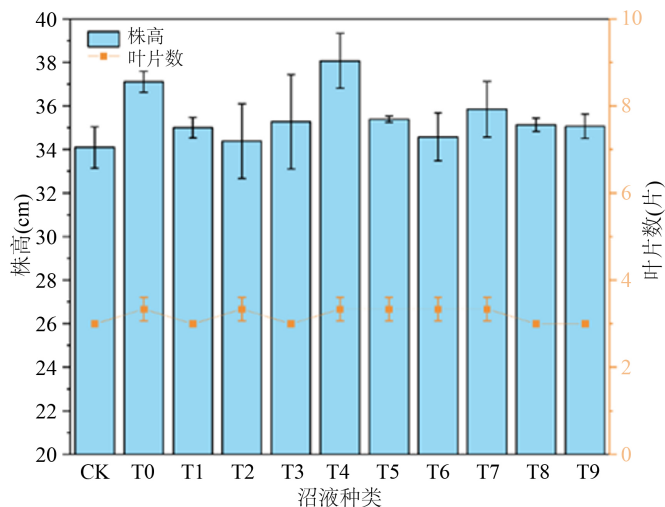


Figure 4. Effects of biogas residue on the growth of maize seedlings

图 4. 沼渣对玉米幼苗生长的影响

Table 3. Effects of biogas residue types on maize biomass

表 3. 沼渣种类对玉米生物量的影响

组别	茎叶鲜重/g	根鲜重/g	茎叶干重/g	根干重/g
CK	$1.63 \pm 0.15a$	$0.66 \pm 0.04ab$	$0.12 \pm 0.01a$	$0.06 \pm 0.00a$
T0	$2.14 \pm 0.09a$	$0.72 \pm 0.01ab$	$0.15 \pm 0.01a$	$0.06 \pm 0.00a$
T1	$1.74 \pm 0.11a$	$0.79 \pm 0.07ab$	$0.13 \pm 0.01a$	$0.06 \pm 0.01a$

Continued

T2	2.00 ± 0.21a	0.87 ± 0.04a	0.15 ± 0.01a	0.06 ± 0.01a
T3	1.60 ± 0.14a	0.73 ± 0.06ab	0.13 ± 0.01a	0.06 ± 0.01a
T4	1.95 ± 0.25a	0.67 ± 0.12ab	0.14 ± 0.02a	0.05 ± 0.01a
T5	1.75 ± 0.16a	0.66 ± 0.06ab	0.13 ± 0.01a	0.05 ± 0.00a
T6	1.83 ± 0.11a	0.48 ± 0.12b	0.14 ± 0.01a	0.06 ± 0.01a
T7	2.00 ± 0.10a	0.73 ± 0.08ab	0.15 ± 0.01a	0.05 ± 0.01a
T8	1.79 ± 0.03a	0.78 ± 0.12ab	0.13 ± 0.00a	0.05 ± 0.01a
T9	1.74 ± 0.02a	0.61 ± 0.03ab	0.13 ± 0.00a	0.04 ± 0.00a

注：表中数据为平均数 ± 标准误差。同列不同字母表示经邓肯氏新复极差法检验在 $p < 0.05$ 水平差异显著。

在本沼渣施肥实验中，施用沼肥的组无论是从株高还是生物量上都优于对照组，表明沼肥的确可以促进玉米幼苗的生长，这个结果也与其他的研究相一致，且本实验采用的 10% 的混合比例也是较优的沼渣施用量[25] [26]。而大部分金属污染则会引起幼苗生长的减缓，表现为株高的降低和生物量的下降。其中 Cu 金属污染在本实验条件下促进了玉米幼苗的伸长，但在生物量上并未能提升。Cu 是众多蛋白质的重要辅因子、参与呼吸代谢和光合作用的电子传递，能调节和改善植物的生理代谢和生长发育，但合适的铜离子含量范围很窄[9]。因此，虽然 Cu 污染沼渣虽然在株高上有所增加，但该铜离子浓度还是不适合玉米的生长和增重。其余不管是单一金属污染还是复合金属污染均对幼苗的株高和生物量有抑制作用。由此可知，在农业生产过程中应格外注意重金属污染引起的作物的不良生长。

4. 结论

本研究分析了不同类型金属污染沼肥对玉米种子发芽和幼苗的影响，以种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数和幼苗的芽长、根长、芽重、根重等指标为基础进行了详细的讨论，得到的具体结果为：

1) 金属污染的沼液显著抑制玉米种子的发芽过程，并且对种子的生物量积累也有较明显的抑制作用。复合金属污染对种子萌发的抑制作用相较于单一金属可能更强烈，T8、T9 组在发芽势上与 T1~T4 组存在显著性差异($p < 0.05$)，且根和芽的生长和生物量积累都受到较大抑制。部分金属添加也可在一定程度上促进种子的发芽，T3 (Ni)组的活力指数较 T0 提高 54.16%，T4 (Cu)组的发芽指数较 T0 组提高 44.23%。

2) 施用沼渣肥可促进玉米幼苗生长和生物量积累，但大部分金属污染则会造成抑制作用，且对茎叶的抑制作用比对根的更强。T2 (Co)组对株高的抑制作用最大，较 T0 组降低 7.36%。T3 (Ni)组的生物量积累受到的抑制相对较大，茎叶鲜重和干重相对 T0 组分别减少 25.03%和 16.03%。仅 T4 (Cu)组对株高有促进作用，较 T0 组提升 2.60%。

通过对金属污染沼液沼渣肥的综合分析可得，金属污染对玉米幼苗的生长主要以抑制为主，且多种金属的复合污染对玉米幼苗的危害更强。沼渣肥能促进幼苗的生长，而被金属污染后其促进作用则会受到限制，仅 Cu 污染的沼渣肥不受影响。有机肥作为一种营养全面、较温和、能改良土壤的肥料，其本身既能有效增加作物产量又对环境破坏较小。而重金属污染一方面影响了作物的生长，另一方面也污染了农田，增加了土地的污染风险等级。本文为有机肥施用过程中各种重金属的影响提供了数据的支持和理论的依据，今后也应将重金属的影响纳入到有机肥的研究当中。

基金项目

本研究受到国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101003)资助。

参考文献

- [1] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
- [2] 张晓霞, 陈能场, 郑煜基. 大宝山矿区上坝村农田土壤重金属污染特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(4): 8-15.
- [3] Fernandes, K.D., Cañote, S.J.B., Ribeiro, E.M., *et al.* (2019) Can We Use Cd-Contaminated Macrophytes for Biogas Production? *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 27620-27630. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2318-2>
- [4] Xin, L., Guo, Z., Xiao, X., *et al.* (2018) Feasibility of Anaerobic Digestion for Contaminated Rice Straw Inoculated with Waste Activated Sludge. *Bioresource Technology*, **266**, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.048>
- [5] 杨建霞, 王秀文, 宁海军, 等. 沼肥不同施肥量对大棚甜瓜生长发育及果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2020(22): 60-65.
- [6] 王艳霞, 陈爱昌. 马铃薯施用沼肥增产效果及抗病性试验研究[J]. 中国沼气, 2020, 38(4): 54-56.
- [7] 巨英庆. 施用沼肥对苹果树营养生长和果实品质的影响[J]. 农业科技与信息, 2020(8): 81-85.
- [8] Lee, J., Park, K.Y., Cho, J., *et al.* (2018) Anaerobic Digestion as an Alternative Disposal for Phytoremediated Biomass from Heavy Metal Contaminated Sites. *Environmental Pollution*, **243**, 1704-1709. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.108>
- [9] 黎建玲, 梁慧灵, 黄肇宇. Cu^{2+} 胁迫对南瓜种子萌发和幼苗初期生长的影响[J]. 玉林师范学院学报, 2017, 38(2): 63-69.
- [10] 陈丽丽, 付媛媛, 王艳萍, 等. 镉锌胁迫对小麦和 2 种杂草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报, 2019, 39(1): 50-57.
- [11] 郑爱珍. Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对糯玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(8): 1828-1831.
- [12] 邹文桐, 曹智, 林茂兹. 铜锌复合胁迫对包菜种子萌发、幼苗生长及子叶若干生理指标的影响[J]. 种子, 2018, 37(3): 92-95.
- [13] 薛建福, 杜军利, 杨文彪, 等. 不同浓度 FeSO_4 浸种对小麦芽苗菜生长和生理活性物质的影响[J]. 种子, 2020, 39(12): 44-50.
- [14] 夏婊, 朱伟, 廖业, 等. Ni^{2+} 胁迫对水稻、白菜种子萌发和生长影响的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(21): 7155-7158.
- [15] 赵红, 王爱斌, 林国卫, 等. 重金属钴对水稻种子萌发及幼苗几项生理指标的影响[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(2): 18-20.
- [16] 李黎, 王丹, 贺佳, 等. 9 种植物种子在钴胁迫下发芽特性及富集能力研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(9): 246-249.
- [17] 曹春信, 刘新华, 吴瑛莉. 畜禽养殖场沼肥重金属污染现状及其修复技术研究[J]. 天津农业科学, 2013, 19(5): 62-65.
- [18] 吴玉红, 郝兴顺, 崔平, 等. 沼液浸种对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国沼气, 2017, 35(5): 70-74.
- [19] 刘军. 微量元素浸种对甜菜种子活力、发芽和幼苗生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2000(5): 228-230.
- [20] 刘媛媛, 方楠, 刘华娇, 等. 沼液对早熟禾种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2019, 38(8): 93-96.
- [21] 史向远, 周静, 王保平, 等. 不同浓度沼液浸种对西瓜种子萌发的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10): 1611-1614.
- [22] 王彦杰, 毕少杰, 洪秀杰, 等. 不同浓度沼液浸种和喷施对谷子生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 119-121.
- [23] Thanh, P.M., Ketheesan, B., Yan, Z., *et al.* (2016) Trace Metal Speciation and Bioavailability in Anaerobic Digestion: A Review. *Biotechnology Advances*, **34**, 122-136. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.006>
- [24] 杨静民. 沼渣在葡萄园施用肥效试验初报[J]. 中国沼气, 2019, 37(2): 85-86.
- [25] 孟清波, 田佳, 李青云, 等. 施用沼渣沼液肥对 PEG 渗透胁迫下辣椒幼苗生理特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(9): 28-33.
- [26] 常鹏, 张英, 李彦明, 等. 沼渣人工基质对番茄幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2010(15): 134-137.