

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.019

苗桓, 许加明, 虞悦, 等. 三种森林土壤中莠去津对蚯蚓的毒性效应. 土壤, 2023, 55(6): 1316–1322.

三种森林土壤中莠去津对蚯蚓的毒性效应^①

苗桓^{1,2}, 许加明^{1,2}, 虞悦², 卜元卿², 王艮梅^{1*}, 周蓉^{2*}

(1 南京林业大学林学院, 南京 210037; 2 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 采用室内实验的方法研究了3种不同类型的森林土壤中莠去津对蚯蚓的影响, 以40、80、160、320、480 mg/kg 莠去津作为暴露浓度, 于暴露0、7、14、21、28、35 d时分别测定土壤中蚯蚓的鲜重和死亡率, 并于暴露0和35 d时测定蚯蚓体宽。结果表明: 3种森林土壤中莠去津暴露浓度越高, 暴露时间越长, 对蚯蚓致死效应越强, 对蚯蚓鲜重和体宽的抑制效应也越强, 呈明显的时间-效应关系和剂量-效应关系。暴露浓度相同时, 3种土壤中莠去津对蚯蚓死亡率、鲜重和体宽的影响均表现为黄棕壤>黄棕壤性土>石灰土。莠去津对蚯蚓的毒性效应与土壤有机质的含量呈负相关, 与全磷和有效磷的含量呈正相关。研究结果揭示不同类型土壤中莠去津对蚯蚓的毒性作用具有明显差异, 且与土壤的肥力相关性较好, 其可为评估莠去津在农林业上使用的环境风险提供基础参考数据。

关键词: 莠去津; 蚯蚓; 森林土壤; 剂量效应; 土壤性质

中图分类号: S714.3 **文献标志码:** A

Toxic Effects of Atrazine on Earthworms in Three Forest Soils

MIAO Huan^{1,2}, XU Jiaming^{1,2}, YU Yue², BU Yuanqing², WANG Genmei^{1*}, ZHOU Rong^{2*}

(1 College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: The responses of earthworms to atrazine in different concentrations in three kinds of forest soils were quantitatively determined by laboratory test. In the toxicity test, 40, 80, 160, 320 and 480 mg/kg were used as exposure concentrations of atrazine, and the fresh weight, body width and mortality of earthworms were measured at 0, 7, 14, 21, 28 and 35 d after exposure. The results showed that lethal effect and inhibitory effect of atrazine on the fresh weight and body width of earthworms increased with the exposure concentration and time with obvious time-effect and dose-effect relationship. At the same concentration, the effect of atrazine on earthworms in the three soils was expressed as typical yellow brown soil > weakly developed yellow brown soil > lime soil. The toxic effect of atrazine on earthworms was negatively correlated with the content of organic matter in soil, and positively correlated with the content of total phosphorus and available phosphorus. The results of the study revealed that the toxic effects of atrazine on earthworms in different types of soil differed significantly, and correlated well with soil fertility, which could provide basic reference data for assessing the environmental risks of atrazine use in agriculture and forestry.

Key words: Atrazine; Earthworm; Forest soil; Dose effect; Soil properties

莠去津, 又名阿特拉津, 属于三嗪类除草剂, 是世界上使用最广泛的除草剂之一。截至2020年10月, 我国所登记的莠去津单剂共246种, 混剂共486种, 莠去津使用量逐年递增^[1]。莠去津对一年生禾本科杂草、阔叶杂草和某些多年生杂草都有一定的抑制作用^[2], 被广泛用于林业幼林抚育期间化学除草以及农业尤其是谷类作物除草。作为一种常见的土壤污染

物, 莠去津进入土壤会危及土地环境安全, 影响其生态服务功能^[3]。

在使用中, 大部分莠去津除了直接进入土壤, 附着在作物上、扩散于大气中的莠去津也会因风吹雨淋进入土壤。由于其性质的特殊性, 莠去津在土壤中的残留时间长, 半衰期最长可达399 d^[4]。研究表明, 许多农田土壤存在莠去津的残留, 不仅影响了土壤理

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1801105)资助。

* 通讯作者(zhourong@nies.org; wanggenmei@njfu.edu.cn)

作者简介: 苗桓(1996—), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境污染。E-mail: mhfrank@njfu.edu.cn

化性质,降低了土壤肥力,还因其难降解、残效期长,对后继作物产生了一定毒害作用^[5]。我国温室和开放农田土壤中莠去津峰值分别为 137 mg/kg 和 134 mg/kg,且大部分温室土壤中莠去津浓度显著高于周边农田土壤^[6]。三江平原农田土壤中莠去津平均浓度为 79.32 mg/kg,存在潜在生态风险^[7]。

许多研究证实,莠去津会对土壤生态系统造成不同程度的伤害^[8]。例如,当土壤中莠去津含量超过 0.5 mg/kg 时将影响水稻等敏感作物的生长^[9];植株受药后会发生叶片变黄、生物量减少^[10]、株高根重降低^[11]甚至死亡的现象^[12]。另外,莠去津会对土壤生物如蚯蚓、线虫的生长发育和运动行为产生严重损伤,影响其正常的生命活动^[13-14],且一般通过氧化胁迫效应、DNA 损伤以及影响生理相关基因表达等方式造成土壤生物群体破坏甚至死亡^[15-16]。

国内学者关于莠去津对土壤动物影响的研究主要集中在毒性机制方面,蚯蚓的毒性试验主要在滤纸或人工土壤中进行。有研究表明,林木根际土壤中的莠去津降解速度快于非根际土^[17]。而目前尚未有关于莠去津对森林土壤中蚯蚓毒性效应的研究。因此,本研究拟通过室内模拟的方法探索 3 种不同森林土壤中莠去津对蚯蚓的毒性效应,以期评估莠去津使

用对森林土壤生物的环境风险提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 受试生物 试验蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),购自南京市江宁区蚯蚓养殖场。挑选 2~3 月龄、生殖环明显、个体重量为 450~500 mg、大小约一致的健康成年蚯蚓作为试验生物。

1.1.2 供试土壤 供试土壤分别取自南京市玄武区紫金山(土壤类型为黄棕壤,植被为竹林),六合区方山(土壤类型为黄棕壤性土,植被为落叶阔叶林和针阔叶混交林)以及江宁区青龙山(土壤类型为石灰土,植被为落叶阔叶林)。经与当地管理部门确认,采样点土壤两年内未施用任何农药,也未涉及相关的农事操作。采用五点采样法采集 0~20 cm 土层新鲜土壤,采样时去除土壤中的石块,并充分混匀后置于自封袋带回实验室。部分样品立即过 40 目筛去除小石子和植物根系等残渣,置于 4 °C 冰箱中保存备用,用于莠去津对蚯蚓的毒性试验研究;部分样品风干后保存,用于测定土壤的基本理化性质。试验土壤的主要理化性质见表 1。

1.1.3 主要试剂 莠去津,纯度为 95%,购于捷马化工股份有限公司;丙酮,分析纯。

表 1 试验土壤的主要理化性质
Table 1 Main physiochemical properties of tested soil

土壤类型	pH	有机质 (g/kg)	含水率 (%)	阳离子交换量 (cmol/kg)	全磷 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	水解性氮 (mg/kg)	全钾 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)
黄棕壤	4.49	37.9	25.2	23.7	762	36.9	2.21	198	15.1	325
黄棕壤性土	6.65	99.9	41.7	28.6	497	8.4	5.29	376	10.7	243
石灰土	6.93	90.2	22.3	21.3	441	3.4	3.21	113	13.9	295

1.2 试验方法

1.2.1 试验前蚯蚓预养 试验前将蚯蚓置于与试验过程相同的环境条件(温度 20 °C ± 2 °C,湿度 80% ± 2%,光照 500~700 Lux,光暗时间比 14 h : 10 h,添加牛粪作为营养物质)下预养 7 d。

1.2.2 莠去津准备 称取 2.105 3 g 的莠去津(纯度为 95%),加丙酮溶解定容至 100 mL,配制成浓度为 20 g/L 的母液。取部分母液分别加入适量丙酮配制成 100、10、1、0.1 mg/mL 的工作液。

1.2.3 莠去津暴露 试验共设计 6 种莠去津暴露浓度处理,分别为 0、40、80、160、320、480 mg/kg 土。按照设定的浓度处理,分别称取 500 g 新鲜土壤加入 1 L 标本瓶中,从中取 10 g 土壤加入不同浓度药液,混匀,平铺放入通风橱中风干 6 h,待丙酮完

全挥发后,将处理过的土壤混入标本瓶中,得到不同莠去津含量的受试土壤,同时设置空白对照(CK1:不加药,只加水)和溶剂对照(CK2:不加药,只加丙酮和水)。每个标本瓶中放入 10 条已在无药土壤样品中预培养的蚯蚓作为 1 个处理,并用纱布封口。每个处理均设 3 个重复。从保存的新鲜土壤中取样置于 105 °C 条件下烘干称重,测定其含水量。各处理加入适量的去离子水以调节土壤水分含量达到干重的 30%~35%,充分搅拌,混匀。将各处理标本瓶放入培养箱(温度 20 °C ± 2 °C,湿度 80% ± 2%,光照 500~700 Lux,光暗时间比 14 h : 10 h)内培养。试验培养周期为 5 周,培养过程中每天不定时用水分速测仪 PR1 测量土壤水分,保持土壤水分在 30%~35%。

1.2.4 毒性效应测定 在试验培养 7、14、21、28

和 35 d 时, 分别观察记录蚯蚓的死亡数和鲜重, 计数时以尾部对机械刺激无反应视为死亡, 蚯蚓死亡后应及时被清除。在培养 0 和 35 d 时测量蚯蚓体宽。测定蚯蚓鲜重前, 先用滤纸吸收蚯蚓皮肤表面的水分。测定蚯蚓体宽时, 先用滤纸吸收蚯蚓皮肤表面的水分, 并待蚯蚓不再蠕动时, 使用游标卡尺进行测定。

1.2.5 数据分析 使用 SPSS 25.0 软件以莠去津有效浓度为自变量(x), 蚯蚓死亡率、鲜重和体宽的变化量为因变量(y), 分别建立药剂与蚯蚓各指标的回归方程, 统计分析半数致死浓度(LC₅₀)、蚯蚓鲜重和体宽的半效应浓度(EC₅₀)及 95% 置信限, 对 LC₅₀ 和 EC₅₀ 与土壤各理化性质做相关性分析, 计算相关系数。

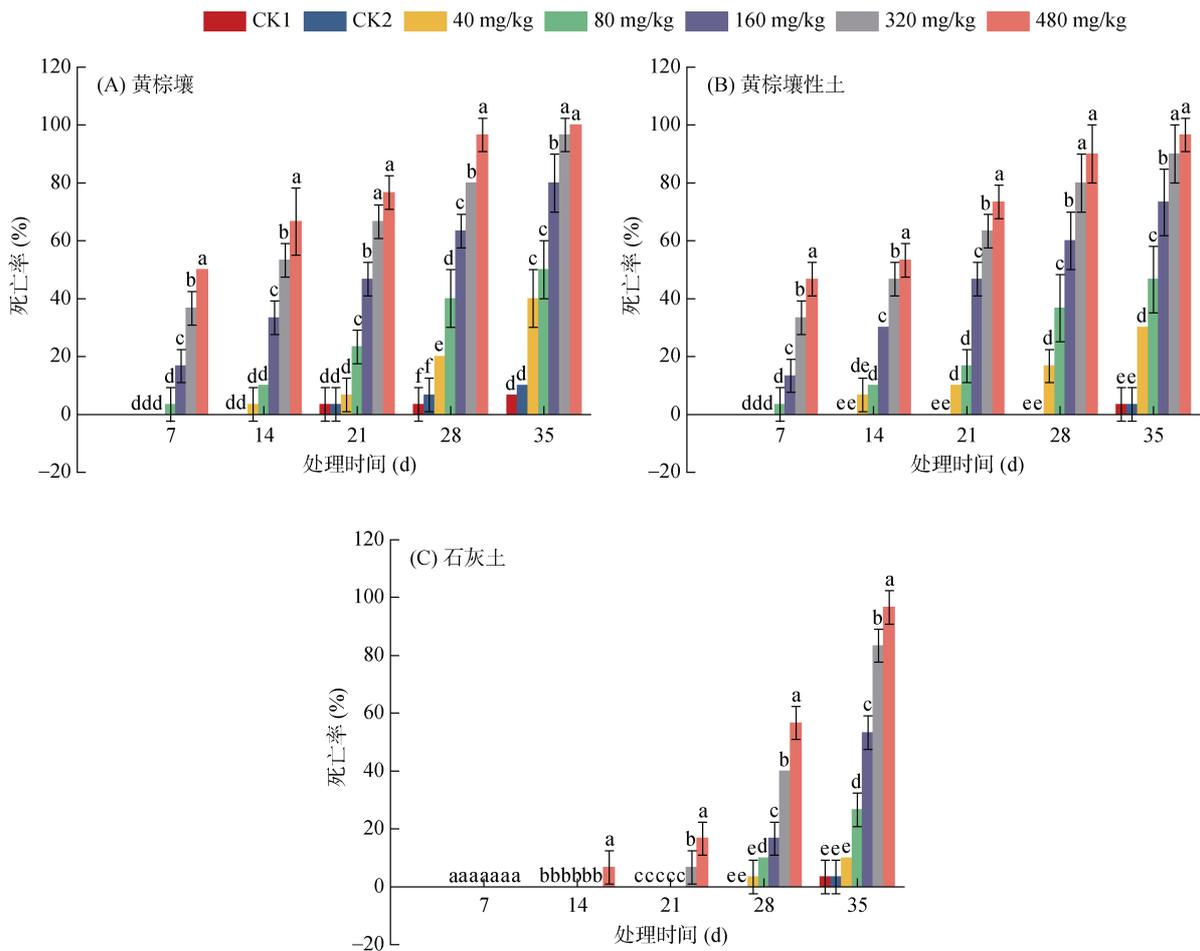
2 结果与分析

2.1 莠去津对蚯蚓死亡率的影响

由图 1 可知, 3 种土壤中各莠去津暴露浓度组蚯蚓的死亡率随着时间的延长而上升, 且暴露浓度越

高, 蚯蚓的死亡率越高。暴露 7 d 时, 黄棕壤和黄棕壤性土中, 160、320、480 mg/kg 三个浓度组蚯蚓的死亡率与对照组相比, 具有显著差异, 而前三者间也存在显著差异, 说明在这两种土壤中短期高浓度(160、320、480 mg/kg)莠去津暴露对蚯蚓的致死效应较强。暴露 14 d 时, 黄棕壤性土中 80 mg/kg 浓度组蚯蚓的死亡率与对照组相比, 出现显著差异($P<0.05$); 石灰土中各浓度组中均逐渐出现蚯蚓死亡的现象。暴露 21 d 时, 黄棕壤中 80 mg/kg 浓度组蚯蚓死亡率与对照组相比, 也出现显著差异($P<0.05$)。暴露 28 和 35 d 时, 黄棕壤和黄棕壤性土中各浓度组蚯蚓死亡率与对照组相比, 均存在显著差异($P<0.05$); 石灰土中, 除 40 mg/kg 浓度组外, 各浓度组与对照组相比, 也均存在显著差异($P<0.05$)。

由表 2 可以看出, 试验期间, 3 种土壤中蚯蚓死亡率的 LC₅₀ 随着时间的延长而逐渐减小, 说明 3 种土壤中莠去津对蚯蚓的致死效应均随着时间的延长而逐渐增强。不同土壤中莠去津对蚯蚓的致死效应存



(图中不同小写字母表示同一时间不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著, 下同)

图 1 三种土壤中不同莠去津浓度暴露后蚯蚓死亡率随时间的响应

Fig. 1 Responses of earthworm mortality to time after exposure to different atrazine concentrations in three soils

表 2 不同土壤中莠去津对蚯蚓的致死效应
Table 2 Lethal effects of atrazine on earthworms in different soils

暴露时 间(d)	黄棕壤		黄棕壤性土		石灰土	
	LC ₅₀ (mg/kg)	95% 置信区间(mg/kg)	LC ₅₀ (mg/kg)	95% 置信区间(mg/kg)	LC ₅₀ (mg/kg)	95% 置信区间(mg/kg)
7	450.2	381.2 ~ 580.9	493.9	431.5 ~ 582.9	—	—
14	320.3	232.8 ~ 571.9	405.0	262.8 ~ 861.7	5 152.0	1 667.3 ~ 11 709.1
21	258.7	158.6 ~ 657.6	262.2	166.9 ~ 724.3	1 340.0	894.8 ~ 3 228.9
28	153.9	97.4 ~ 363.1	160.1	104.6 ~ 506.2	425.2	370.2 ~ 480.9
35	43.5	24.4 ~ 244.0	98.1	54.1 ~ 406.2	199.4	130.9 ~ 384.6

在差异。莠去津暴露 7 d 时, LC₅₀ 表现为黄棕壤<黄棕壤性土, 而石灰土中未观察到蚯蚓死亡; 暴露 14、21、28 和 35 d 时, 蚯蚓的 LC₅₀ 均表现为黄棕壤<黄棕壤性土<石灰土。可见, 莠去津暴露浓度相同时, 黄棕壤中的蚯蚓受到的致死效应最强, 石灰土中的蚯蚓受到的致死效应最弱。

2.2 莠去津对蚯蚓鲜重的影响

由图 2 可知, 3 种土壤中除 40 mg/kg 浓度组外, 其他各浓度组蚯蚓鲜重随着时间的延长均出现了显著的下降, 且浓度越高, 鲜重降低越多。

试验期间, 黄棕壤中各浓度组蚯蚓鲜重与对照组相比, 均存在显著差异($P<0.05$), 说明黄棕壤中 40 mg/kg 的莠去津暴露即可对蚯蚓鲜重产生明显的抑制作用。黄棕壤性土和石灰土中, 除 40 mg/kg 浓度组外, 其余浓度组蚯蚓鲜重与对照组相比, 均存在显著差异($P<0.05$), 说明上述两种土壤中 80 mg/kg 及以上浓度的莠去津暴露均对蚯蚓鲜重存在明显的抑制作用($P<0.05$), 且暴露 35 d 时最大可观察无效应浓度(NOEC)值均为 40 mg/kg。

由表 3 可以看出, 3 种土壤中蚯蚓鲜重的 EC₅₀ 随着时间的延长而逐渐减小, 说明 3 种土壤中莠去津对蚯蚓体重的抑制作用均随着时间的延长而逐渐增强。不同土壤中莠去津对蚯蚓体重的抑制作用存在差异。暴露 7 d 时, 蚯蚓鲜重的 EC₅₀ 表现为黄棕壤性土>石灰土>黄棕壤, 其中黄棕壤性土和石灰土中蚯蚓鲜重的 EC₅₀ 值极为接近, 均远高于黄棕壤; 暴露 14、21、28 和 35 d 时, 蚯蚓鲜重的 EC₅₀ 均表现为黄棕壤<黄棕壤性土<石灰土。说明莠去津暴露浓度相同时, 黄棕壤中蚯蚓体重受到的抑制作用最强, 暴露后 7 d 内黄棕壤性土和石灰土中蚯蚓体重受到的抑制作用相近, 而暴露 7d 后, 石灰土中的蚯蚓体重受到的抑制作用最弱。

2.3 莠去津对蚯蚓体宽的影响

由图 3 可知, 3 种土壤中莠去津对蚯蚓体宽的抑制作用均随浓度的增加而增加。暴露 35 d 时, 黄棕

壤和黄棕壤性土中, 高浓度组(320、480 mg/kg)蚯蚓体宽与对照组相比, 存在显著差异($P<0.05$); 石灰土中, 仅 480 mg/kg 浓度组蚯蚓体宽与对照组存在显著差异($P<0.05$)。该结果表明高浓度的莠去津暴露对蚯蚓体宽存在明显的抑制作用。

由表 4 可以看出, 不同土壤中莠去津对蚯蚓体宽的抑制作用存在差异。暴露 35 d 时, 蚯蚓体宽的 EC₅₀ 值表现为黄棕壤<黄棕壤性土<石灰土, 说明莠去津暴露浓度相同时, 黄棕壤中的蚯蚓体宽受到的抑制作用最强, 石灰土中的蚯蚓体宽受到的抑制作用最弱。

2.4 莠去津的蚯蚓毒性与土壤性质的相关性

从表 5 可以看出, 试验期间, 蚯蚓的毒性效应终点(LC₅₀、鲜重 EC₅₀、体宽 EC₅₀)与土壤 pH、有机质和全氮含量呈正相关关系, 与土壤全磷、有效磷、水解性氮、速效钾、全钾含量呈负相关关系, 相关性大小表现为有效磷>全磷>有机质>pH>水解性氮>速效钾>全氮>全钾。相对于其他土壤性质指标, 莠去津对蚯蚓的毒性作用与土壤有机质、有效磷和全磷具有较好的相关性。

3 讨论

土壤中蚯蚓的数量是评价土壤肥力和反映土壤健康状况的生物学指标^[18], 蚯蚓数量越多, 说明土壤越肥沃^[19]。蚯蚓处于土壤食物链的底层, 日常活动在土壤浅层, 极易接触到农药, 是土壤农药污染的直接受害者, 所以蚯蚓也被用作土壤农药残留的预警生物^[20]。

本试验结果表明, 3 种土壤中蚯蚓鲜重和体宽受抑制作用随着污染暴露时间延长而增强, 死亡率随污染暴露时间增长而升高, 且莠去津浓度越高, 抑制作用越强, 呈现明显的时间-效应关系和剂量-效应关系。刘嫦娥^[21]采用野外土壤进行 14 d 的蚯蚓毒性试验, 测定不同浓度莠去津下不同时间蚯蚓鲜重的变化, 研究发现, 第 1 周各浓度组蚯蚓鲜重降幅均大于第 2 周, 处理组蚯蚓鲜重随着时间的延长持续降低,

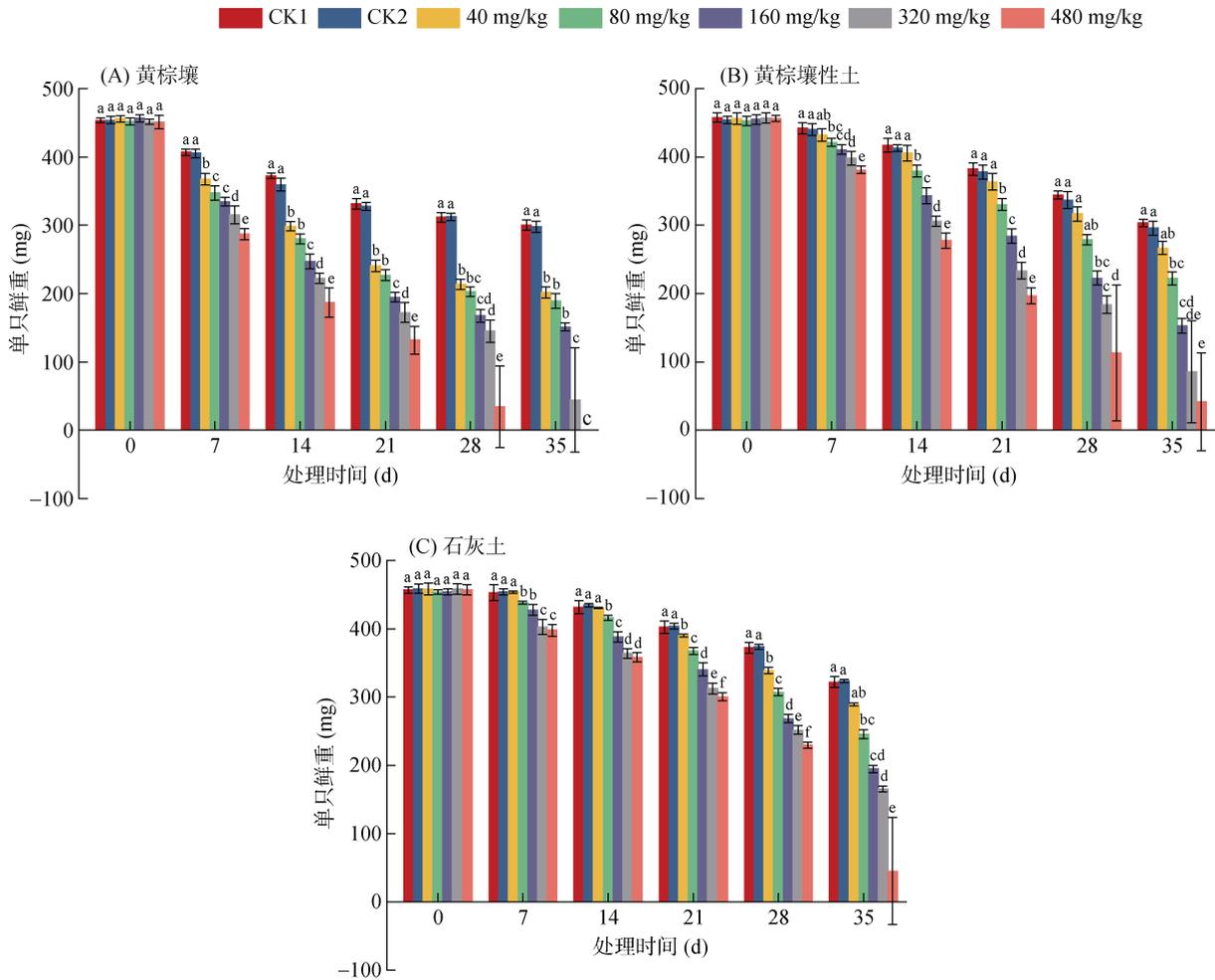


图 2 三种不同土壤中不同莠去津浓度暴露后蚯蚓鲜重随时间的响应

Fig. 2 Responses of earthworm fresh weight to time after exposure to different atrazine concentrations in three different soils

表 3 不同土壤中莠去津对蚯蚓鲜重的影响

Table 3 Effects of atrazine on earthworm fresh weight in different soils

暴露时间 (d)	黄棕壤		黄棕壤性土		石灰土	
	EC ₅₀ (mg/kg)	95%置信区间(mg/kg)	EC ₅₀ (mg/kg)	95%置信区间(mg/kg)	EC ₅₀ (mg/kg)	95%置信区间(mg/kg)
7	835.6	624.6 ~ 1 260.9	1886.9	1 451.4 ~ 2 699.5	1802.3	1 150.0 ~ 4 157.1
14	300.2	222.5 ~ 460.8	628.6	443.7 ~ 1 076.8	1223.3	732.8 ~ 3 699.6
21	73.4	56.5 ~ 104.7	363.5	258.1 ~ 614.6	799.3	503.5 ~ 1 934.9
28	19.5	12.9 ~ 39.5	205.2	150.2 ~ 323.5	445.2	256.1 ~ 1 699.7
35	5.5	4.3 ~ 7.6	66.3	45.2 ~ 124.1	135.3	95.5 ~ 231.8

且暴露浓度越高，蚯蚓鲜重降低越大；徐建等^[16]采用滤纸法研究莠去津对蚯蚓的毒性，发现 40 mg/L 莠去津暴露 24 h 内，蚯蚓死亡率仅为 10%，而 50 mg/L 莠去津暴露 48 h 内，死亡率达到 90%；胡玲等^[22]研究不同浓度下莠去津对蚯蚓的致死效应，结果表明，在 40 mg/kg 浓度下 48 h 时蚯蚓出现死亡；王彦华等^[23]采用人工土壤法研究发现，莠去津对蚯蚓暴露 7 d 和 14 d 的半致死浓度 LC₅₀ 分别为 204.8 和 180.4 mg/kg。

本试验结果与上述研究结果基本一致。除浓度和时间外，莠去津所处的土壤环境也会影响其对土壤生物的毒性作用。本试验结果表明，不同土壤中蚯蚓致死效应存在差异，黄棕壤中蚯蚓的致死效应最强，石灰土中蚯蚓的致死效应最弱，这反映了土壤理化性质会影响莠去津对蚯蚓的毒性效应。通过蚯蚓死亡率 LC₅₀ 与不同土壤理化性质的相关性分析发现，有机质含量与莠去津毒性有较强的负相关性，这与吴丹^[10]研究

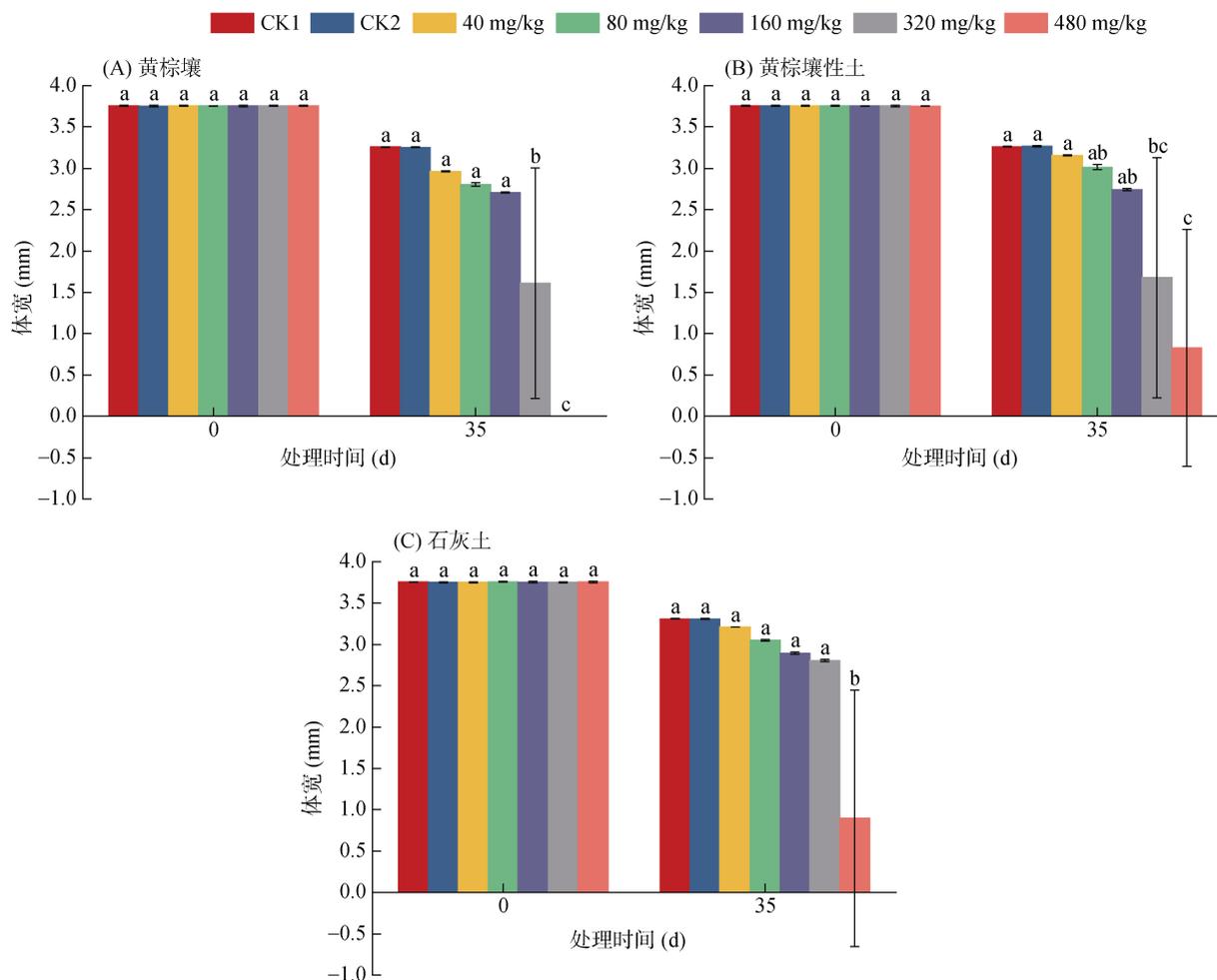


图 3 三种不同土壤中不同莠去津浓度暴露后蚯蚓体宽随时间的响应

Fig. 3 Responses of earthworm width to time after exposure to different atrazine concentrations in three different soils

表 4 不同土壤中莠去津对蚯蚓体宽的影响

Table 4 Effects of atrazine on earthworm body width in different soils

暴露时间 (d)	黄棕壤		黄棕壤性土		石灰土	
	EC ₅₀ (mg/kg)	95% 置信区间(mg/kg)	EC ₅₀ (mg/kg)	95%置信区间(mg/kg)	EC ₅₀ (mg/kg)	95%置信区间(mg/kg)
35	235.8	166.3 ~ 415.8	288.0	247.5 ~ 325.1	367.8	188.011 ~ 8 460.5

表 5 蚯蚓属性与土壤理化性质的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of earthworm properties with soil physiochemical properties

效应终点	pH	有机质	全磷	有效磷	全氮	水解性氮	速效钾	全钾
LC ₅₀	0.667	0.831	-0.849	-0.862	0.152	-0.474	-0.197	-0.096
鲜重 EC ₅₀	0.761	0.898	-0.913	-0.923	0.283	-0.351	-0.327	-0.228
体宽 EC ₅₀	0.704	0.858	-0.875	-0.887	0.202	-0.428	-0.247	-0.146

莠去津在不同土壤中对大豆的胁迫效应结果相符。这可能是因为土壤中有有机质能够吸附莠去津分子,并显著降低其生物有效性。有研究表明,有机质能够通过π-π键、氢键、静电作用等多种机理与莠去津发生化学和物理吸附^[24-26],增加莠去津吸附残留,有效减少污染物的浓度,从而降低其生态和人体健康风险^[27]。

此外,本研究还发现,土壤有效磷、全磷含量与莠去津毒性有强的正相关性。相关试验也证实外源磷会加重高浓度莠去津胁迫下生物受到的伤害^[28]。但也有研究发现,土壤中有有效磷和全磷与莠去津的降解半衰期无显著相关性^[29],或者添加外源磷可以促进土壤中莠去津的消解^[30]。这些研究结果的差异,可能是

因为仅通过全磷、有效磷含量并不能准确地评估土壤磷的营养供应能力导致的^[31]。

4 结论

1) 莠去津浓度越高, 污染时间越长, 对蚯蚓的毒性效应越强, 高浓度和长时间的莠去津暴露, 对土壤环境安全具有潜在的生态风险。

2) 莠去津在不同理化性质的土壤中对蚯蚓影响程度不同, 毒性效应与土壤有机质的含量呈负相关, 与全磷和有效磷的含量呈正相关, 可见土壤肥力显著影响莠去津对蚯蚓的毒性作用。

3) 在有机质含量较低的地区使用莠去津产生的环境风险相对较高, 今后农林业在施用除草剂时可将土壤性质列为参考因素。

参考文献:

- [1] 司友斌, 孟雪梅. 除草剂阿特拉津的环境行为及其生态修复研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2007, 34(3): 451-455.
- [2] 张静, 李墨, 袁新, 等. 三种检测方法对比水中莠去津残留研究[J]. 安徽化工, 2021, 47(4): 132-134.
- [3] 司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 625-642.
- [4] 李博. 土壤中阿特拉津环境行为及降解转化研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(5): 141-145.
- [5] 郝文波, 李丽春, 韩云, 等. 6 种长效除草剂土壤残留致烟草药害症状及其致害临界值[J]. 广东农业科学, 2013, 40(9): 80-82, 89.
- [6] Dou R N, Sun J T, Deng F C, et al. Contamination of pyrethroids and atrazine in greenhouse and open-field agricultural soils in China[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 701: 134916.
- [7] 王春勇, 夏龙, 王鹏飞, 等. 农田、退耕还湿地、天然草本沼泽土壤重金属和农药的分布及潜在生态风险评估——以抚远市乌苏镇东兴村为例[J]. 湿地科学, 2019, 17(2): 222-227.
- [8] 董静, 夏龙超, 平永青, 等. 水环境中阿特拉津污染及修复研究现状[J]. 应用化工, 2022, 51(1): 144-149.
- [9] 王英姿, 纪明山, 黄国宏, 等. 土壤中莠去津对几种农作物安全临界浓度的确定[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(1): 33-34.
- [10] 吴丹. 阿特拉津在不同类型土壤中的环境行为及其对大豆胁迫作用的差异[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [11] 王淑楠. 莠去津与镉复合胁迫对玉米幼苗生态毒性的影响[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [12] 陈良燕, 林玉锁. 莠去津乙草胺和甲磺隆 3 种除草剂对青菜危害的生物测试[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 111-114.
- [13] 高敏苓, 戴树桂, 张平. 绿麦隆、阿特拉津单一与复合污染对蚯蚓的毒性效应研究[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 525-528.
- [14] Yin J C, Hong X, Ma L Y, et al. Non-targeted metabolomic profiling of atrazine in *Caenorhabditis elegans* using UHPLC-QE orbitrap/MS[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 206: 111170.
- [15] 孟琰, 王金花, 朱鲁生, 等. 莠去津对赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 体腔细胞 DNA 损伤的研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5): 24-29.
- [16] 徐建, 张平, 穆洪, 等. 两种除草剂复合污染对蚯蚓的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1188-1192.
- [17] Yao B, Gu X J, Shu Y G, et al. Degradation of atrazine and changes in soil biological indices throughout dendroremediation using poplars[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(6): 2331-2339.
- [18] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603-616.
- [19] 陈旭飞, 张池, 戴军, 等. 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1114-1125.
- [20] 陈林华, 江吉红, 杨正见, 等. 蚯蚓生物标志在农药污染评价中的应用[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(1): 130-134.
- [21] 刘嫦娥. 四种除草剂对蚯蚓生理生态的影响及其降解特征[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [22] 胡玲, 林玉锁, 常卫民, 等. 吡喃丹和阿特拉津单一和复合作用对蚯蚓致死效应的研究[J]. 科技信息, 2008(31): 713-714.
- [23] 王彦华, 赵学平, 苍涛, 等. 莠去津和毒死蜱对蚯蚓的单一与联合毒性效应: 环境安全与生态学基准/标准国际研讨会、中国毒理学会环境与生态毒理学专业委员会第三届学术研讨会、中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会 2013 年学术研讨会[C]. 南京, 2013.
- [24] Cao Y, Wang L P, Kang X D, et al. Insight into atrazine removal by fallen leaf biochar prepared at different pyrolysis temperatures: Batch experiments, column adsorption and DFT calculations[J]. Environmental Pollution, 2023, 317: 120832.
- [25] 梁茂儒, 陆玉芳, 马明坤, 等. 木屑生物质炭对水中阿特拉津、多菌灵和啶虫脒复合农药的吸附性能研究[J]. 土壤, 2022, 54(4): 793-801.
- [26] Cheng C H, Shi X J, Yin G W, et al. Atrazine adsorption by graphene-based materials: Interaction mechanism and application in real samples[J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 28: 102823.
- [27] 董攀月, 陈禹竹, 曾军, 等. 不同施肥处理下旱地红壤中阿特拉津的环境归趋及其调控研究[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1201-1209.
- [28] 武淑文, 侯磊, 洪子萌, 等. 阿特拉津胁迫下外源磷对香蒲磷吸收和抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 844-851.
- [29] 陈世宇. 不同土壤中阿特拉津降解特征、降解基因分布及细菌群落演替规律[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [30] 张超兰, 徐建明. 氮磷无机营养物质对莠去津在土壤中消解的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1694-1697.
- [31] 刘瑾, 杨建军. 近三十年农田土壤磷分子形态的研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 558-567.