



刘前亮,陈雪雪,简槐良,等.有机肥对污染土壤上蚯蚓生长及 Cd 和 Pb 吸收的影响[J].黑龙江农业科学,2020(8):37-41.

有机肥对污染土壤上蚯蚓生长及 Cd 和 Pb 吸收的影响

刘前亮¹,陈雪雪¹,简槐良¹,罗 洋^{1,2}

(1. 贵州师范学院 地理与资源学院,贵州 贵阳 550018;2. 贵州师范学院 贵州省流域地理国情监测重点实验室,贵州 贵阳 550018)

摘要:为促进重金属污染土壤的修复,以赤子爱胜蚓为试验动物,以秸秆、牛粪、羊粪作为供试有机肥,采用室内接种法,研究有机肥对复合污染土壤上蚯蚓生长和 Cd 和 Pb 吸收的影响。结果表明:在不同处理条件下,污染土壤中蚯蚓数量顺序大小依次为秸秆>羊粪>牛粪>CK(不添加有机肥),其中施用秸秆有机肥时有较少的产卵量;蚯蚓个体均重大小顺序为秸秆>牛粪>羊粪>CK;与对照相比,添加牛粪、羊粪和秸秆后,蚯蚓体内 Cd 含量分别降低了 84.60%、94.02% 和 8.67%,蚯蚓体内 Pb 含量分别降低了 16.53%、15.04% 和 4.17%。试验后土壤有效态 Cd 和 Pb 含量大小顺序均为 CK>羊粪>牛粪>秸秆,其中秸秆处理组土壤有效态 Cd 和 Pb 浓度与对照相比分别降低了 1.45 和 430.35 mg·kg⁻¹。因此,秸秆发酵有机肥较适合于蚯蚓的生长,利于蚯蚓富集土壤中的重金属 Cd 和 Pb。

关键词:重金属;有机肥;蚯蚓

土壤是生态环境系统中重要的组成部分,是人类社会发展和赖以生存的主要资源之一。由于

全球人口增长速率过快、工业生产迅速发展以及农药、化肥的过量施用,大量重金属元素不断进入到土壤中,使土壤重金属污染日益加重。据研究表明,过量的重金属通过土壤-植物-食物链的传递和富集,最终危害人体健康^[1-2]。因此,开展重金属污染土壤的修复工作极其重要和紧迫^[3],如何选择合适的方法一直是学者们关注的问题^[4-5]。

收稿日期:2020-03-09

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1247号);贵州师范学院大学生创新创业训练计划项目(2018520496)。

第一作者:刘前亮(1997-),男,在读学士,专业为农业资源与环境。E-mail:1914584460@qq.com。

通信作者:罗洋(1989-),男,硕士,讲师,从事土壤改良与污染修复研究。E-mail:luoyang2007730@163.com。

Orthogonal Polynomial Regression Analysis of Fertilizer Efficiency Prediction Model for High Protein Soybean

TIAN Yi-xin, GAO Feng-ju, CAO Peng-peng

(Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou 253012, China)

Abstract: In order to optimize the fertilizer application in high-protein soybean production, multivariate orthogonal polynomial regression was used in this paper to model the dependence between fertilizer amount and soybean yield. The results showed that with the increase of nitrogen and potassium fertilizer application, soybean yield first increased and then decreased, and with the increase of phosphorus fertilizer, soybean yield showed a positive correlation line trend, and the effect size was nitrogen>phosphate>potassium. The variance estimate of regression model established by orthogonal polynomial was $\hat{\sigma}^2 = 31.2616$, and the 95% confidence interval of high-protein soybean yield per hectare was $\hat{U} \pm 1.96\sigma = U \pm 61.2727$, with good effect. According to the model fitting, the maximum yield of soybean was 3365.73 kg·hm⁻², when N, K and P were 56.39, 70.22 and 140.00 kg·hm⁻², respectively. The multivariate orthogonal polynomial regression model has practical reference value for predicting the yield of high-protein soybean under multi-factor fertilization.

Keywords: high-protein soybean; fertilization; production; multivariate orthogonal polynomial regression model

生物修复技术是指用生物的生命代谢活动,对受污土壤中重金属进行清除的过程^[6]。因其具有生态、高效、低投资、二次污染少等特性,在土壤重金属污染修复领域获得广泛认可。蚯蚓作为土壤环境中最常见、数量较多的大型无脊椎动物,在改善土壤结构、提高土壤肥力、促进物质循环等方面起着重要的作用。此外,蚯蚓对被重金属污染的土壤也具有一定的净化能力^[5]。王振中等^[7]研究表明,农业用地、城市及工业区土壤中的蚯蚓是监测各种污染的良好指示者。因此,将蚯蚓应用于污染土壤生态系统的恢复,具有一定的发展潜力。

施入有机肥可为蚯蚓提供食物来源,能增强其活性并充分发挥其生态服务功能^[8],利于重金属污染土壤的修复,其强化效果主要受有机肥种类影响^[9]。本研究以 Cd 和 Pb 复合污染土壤为供试土壤,以赤子爱胜蚓为试验动物,以秸秆、牛粪和羊粪作为试验有机肥,探讨不同有机肥对污染土壤上蚯蚓生长及铅镉吸收的影响,为今后重金属污染土壤的修复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤:取自贵阳市乌当区鱼洞峡后山农用地,挖取耕作层 15~20 cm 的土壤,分装入袋,带回实验室后,去除其中混杂的植物根茎和大块石头,置于阴暗、通风条件下自然风干,过 5 mm 筛备用。

供试有机肥:玉米秸秆、牛粪、羊粪发酵有机肥均为网上购买。

供试蚯蚓:赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),网上购买,其基本特征如下:表栖型,体长 35~130 mm,一般短于 70 mm,宽 3~5 mm,体节数 80~110,其活动主要集中在腐殖质层^[10]。

1.2 方法

1.2.1 污染土壤制备 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》管制值,采用乙酸铅(优级纯)、氯化镉(优级纯)以溶液方式制备模拟 Cd 和 Pb 复合污染土壤,制备后土壤 Cd 和 Pb 含量分别为 2.82 和 2 215.62 mg·kg⁻¹,pH 为 7.56,置于上口直径 23 cm,盆高 22 cm,盆底直径

18 cm花盆中,每盆装土 2.5 kg,老化 30 d。

1.2.2 试验设计 本试验共 4 个处理,分别为: N(牛粪)、Y(羊粪)、J(秸秆)和 CK(对照,不添加有机肥)。有机肥添加量为 150 g·盆⁻¹,每个处理均设置 3 个重复。蚯蚓饲养盆放置于阴凉的实验室内,在自然环境温度条件下培养。蚯蚓饲养盆底部设置有透气孔,在容器底部放置细孔纱布,为防止蚯蚓从透气孔逃逸。每个盆内接种重量为 36 g 的赤子爱胜蚓。盆内土壤湿度大致控制在田间持水量的 50%~60%,30 d 后,试验结束,检出蚯蚓并计算活体蚯蚓数量,将其用去离子水洗去表皮土壤,置于干净滤纸上吐泥 5 h,洗净其表皮所粘附的泥后称重。将称重后的蚯蚓,先置于冰柜中冷冻死亡,再置于烘箱中 105 ℃烘 8 h 后取出冷却,研磨成粉状,留待检测。

1.2.3 测定项目及方法 随机挑选 15 条蚯蚓,用万分之一天平称重,得出单条重量;蚯蚓产卵量采用手捡法;蚯蚓 Cd 和 Pb 含量采用 HNO₃+H₂O₂体系,置于微波消解仪中按表 1 程序进行消解,原子吸收分光光度法测定;土壤有效态 Cd 和 Pb 含量采取 0.1 mol·L⁻¹ 盐酸浸提,原子吸收分光光度法测定。

1.2.4 数据分析 试验数据先用 Excel 2016 求平均值与标准差,再用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,采用 LSD 法进行多重比较。

表 1 蚯蚓样品微波消解温度与时间

Table 1 Temperature and time of microwave digestion of earthworm samples

步骤 Step	温度 Temperature/℃	时间 Time/min
1	120	16
2	150	16
3	190	26

2 结果与分析

2.1 有机肥对蚯蚓生长的影响

由表 2 可知,各处理条件下蚯蚓的重量较试验前均有所降低。在 Cd 和 Pb 复合污染土壤中,各处理的蚯蚓重量依次为 J>Y>N>CK,添加秸秆后蚯蚓重量显著高于其他处理($P<0.05$);

蚯蚓数量大小顺序依次为J>Y>N>CK。与试验前相比,N处理组、Y处理组和J处理组的蚯蚓重量分别降低了88.00%、51.14%和40.00%。与试验前相比,N处理组、Y处理组和对照组的蚯蚓数量分别降低了74.61%、3.88%和81.00%,其中牛粪处理组的减少量最大,达65条

左右。而秸秆处理组蚯蚓数量增加了3条,表明秸秆发酵有机肥有利于重金属Cd和Pb复合污染土壤上蚯蚓的繁殖。在Cd和Pb复合污染土壤中,各处理条件下蚯蚓个体均重以秸秆处理组J最大,CK最小,表明秸秆添加后蚯蚓的个体发育状况好于其他处理。

表2 各处理条件下的蚯蚓生长状况

Table 2 Earthworm growth status under different treatments

处理 Treatment	蚯蚓重量 Earthworm weight/g		蚯蚓数量/条 Number of earthworms		蚯蚓个体重量 Weight per earthworm/g	产卵数 Spawn
	试验前	试验后	试验前	试验后		
	Before the test	After the test	Before the test	After the test		
N	36.00	4.32±1.37 c	86.67±1.15	22.00±10.00	0.21±0.04	0±0.00
Y	36.00	17.59±2.62 b	94.67±9.85	91.00±1.00	0.21±0.02	0±0.00
J	36.00	21.60±0.84 a	93.00±6.08	96.00±3.61	0.22±0.00	3.50±1.50
CK	36.00	3.25±0.11 c	93.00±7.55	17.67±2.52	0.19±0.03	0±0.00

注:不同小写字母差异显著(P<0.05),下同。
Note:Different lowercase letters indicate significant difference(P<0.05),the same below.

2.2 有机肥对蚯蚓体内Cd和Pb含量的影响

由表3可知,在Cd和Pb复合污染土壤中,各处理条件下蚯蚓体内Cd的含量大小依次为CK>J>N>Y,其中N处理组与Y处理组无显著区别。与对照相比,牛粪、羊粪中蚯蚓体内Cd含量分别降低了84.60%和94.02%,达显著性水平(P<0.05),秸秆处理组与牛粪处理组、羊粪处理组也有显著差异(P<0.05);J处理组蚯蚓体内Cd含量明显大于N和Y处理组,但对对照相比差异不显著(P>0.05),表明秸秆发酵有机肥在促进蚯蚓生长的同时,其体内重金属Cd富集量并未有明显降低。各处理条件下蚯蚓体内Pb的含量大小依次为CK>J>Y>N,且四者之间的

差异不显著。从表3中还可以看出,添加有机肥条件中,秸秆处理土壤中蚯蚓富集Pb最多,达1129.39 mg·kg⁻¹,说明秸秆发酵有机肥相比牛粪和羊粪更有利于蚯蚓富集重金属Pb。综上,在污染土壤中,添加秸秆发酵有机肥有利于蚯蚓富集重金属Cd和Pb。

2.3 有机肥对土壤有效态Cd和Pb含量的影响

由表4可知,在Cd和Pb复合污染土壤中,各处理条件下土壤有效态Cd的含量大小依次为CK>Y>N>J,且四者之间的差异不显著。与对照相比,添加秸秆处理组土壤有效态Pb含量降低的最多,达34.69%。各处理条件下土壤有效态Cd的含量大小依次为CK>Y>N>J,其中牛粪处理组、羊粪处理组和对照组之间无显著差异。与对照相比,N处理组、Y处理组中土壤有效态Pb含量分别降低了4.75%和1.27%,且羊粪处理组中土壤有效态Pb含量较牛粪处理组多3.65%,J与N、Y、CK之间均有显著差异(P<0.05),与对照相比,秸秆处理组中土壤有效态Pb含量降幅最大,达20.03%。综上,各有机肥条件下土壤有效态Cd和Pb含量大小顺序均为CK>Y>N>J,秸秆能有效降低土壤有效态重金属Cd和Pb含量。

表3 各处理条件下蚯蚓体内Cd和Pb含量

Table 3 Contents of Cd and Pb in earthworms under different treatments

处理 Treatments	蚯蚓体内重金属含量	
	Heavy metal content in earthworms/(mg·kg ⁻¹)	
	Cd	Pb
N	3.09±1.12 b	983.81±136.91 a
Y	1.20±0.39 b	1001.35±141.95 a
J	18.33±1.91 a	1129.39±47.63 a
CK	20.07±1.88 a	1178.59±32.74 a

表 4 不同处理条件下试验后土壤有效态 Cd 和 Pb 含量

Table 4 Contents of available Cd and Pb in the soil after testing under different treatment conditions

处理 Treatment	土壤有效态 Cd 和 Pb 含量 Available Cd and Pb content in the soil/(mg·kg ⁻¹)	
	Cd	Pb
N	2.80±0.09 a	2046.01±57.88 a
Y	3.06±0.29 a	2120.70±174.98 a
J	2.73±0.32 a	1717.68±78.48 b
CK	4.18±0.06 a	2148.03±89.80 a

3 结论与讨论

3.1 讨论

土壤性质、土壤类型以及施用有机物料的性质对蚯蚓活动都有着极大的影响^[11]。根据蚯蚓特化的生态功能和适应能力,Boucher^[12]将其划分为表层种、内层种和深层种 3 种生态类型。本研究中选用的赤子爱胜蚓属于典型的表层种,主要以有机物为食,并居住在有机物内。通过向 Cd 和 Pb 污染土壤上施加 3 种不同的有机肥后,蚯蚓的生长状况有所不同,表明不同基质对蚯蚓的发育和增殖有很大的影响^[13]。其生物量在秸秆中最多,羊粪中次之,牛粪中最少。原因可能是:一方面,蚯蚓通过吞食、过腹等过程对秸秆起到了分解、破碎作用,形成食源支撑蚯蚓的生命活动,促进其生长发育^[14];另一方面,秸秆分解形成的有机物可络合部分重金属,缓解了重金属对蚯蚓的毒害作用^[15]。牛粪、羊粪等畜禽粪虽然也富含有机质,然而其含水量往往高达 70%~80%,适宜蚯蚓的初期生长,但随着培养时间的增加,不能满足蚯蚓生长要求的通气条件,因此其生长情况比有机质含量高、透气性良好的秸秆要差^[16-18]。与试验前相比,秸秆处理组蚯蚓总重量下降了 40%,数量却增加了 3 条。可能是因为部分蚯蚓产卵后死亡,而小蚯蚓体内重金属累积量尚低,未引起明显中毒现象,但后期基料不够,加上重金属富集量的增加,抑制了蚯蚓的生长,导致蚯蚓较试验前瘦小。

蚯蚓对土壤重金属的富集能力与蚯蚓种类、

重金属类型、污染浓度以及土壤的理化性质有很大相关性^[19]。本研究通过施用 3 种不同的有机肥发现,和对照相比,添加有机肥处理组蚯蚓体内重金属含量呈下降趋势,其中秸秆发酵有机肥处理组 Cd 和 Pb 含量最大,与前人研究结果一致^[20]。原因可能是有机肥施入改变了土壤中 Cd 和 Pb 的存在形态,降低了其生物有效性,抑制了蚯蚓对重金属的吸收^[21]。而秸秆由于可以增加物料的通气性,给蚯蚓提供了良好的生活环境^[22],亦为其生长繁殖和微生物生长提供营养^[23],因此增强了蚯蚓的重金属耐性。

本研究采用花盆养殖法,对赤子爱胜蚓在牛粪、羊粪、秸秆 3 种发酵有机肥添加条件下在 Cd 和 Pb 复合污染土壤中的生长状况和重金属吸收特点进行了探讨,综合各项指标,发现秸秆有机肥效果最好。然而,不同污染浓度、不同重金属类型、不同有机肥施用量条件下的蚯蚓重金属富集量及生长状况如何,有待后续研究的开展。

3.2 结论

首先,在 Cd 和 Pb 复合污染土壤中,添加秸秆后蚯蚓的生物量最大,羊粪次之,牛粪最少;其次,试验后牛粪、羊粪和秸秆 3 种有机肥处理组蚯蚓体内 Cd 含量分别为 3.09、1.20 和 18.33 mg·kg⁻¹,与对照相比分别降低了 84.60%、94.02% 和 8.67%;蚯蚓体内 Pb 含量分别为 983.81、1 001.35 和 1 129.39 mg·kg⁻¹,与对照相比分别降低了 16.53%、15.04% 和 4.17%;最后,添加秸秆、牛粪和羊粪后,土壤有效态 Cd 与对照相比,分别降低了 34.69%、33.01% 和 26.79%;土壤有效态 Pb 分别降低了 20.03%、4.75% 和 1.27%。

参考文献:

[1] 冯依涛,阎秀兰,佟雪娇,等.再生铝企业周边农田土壤与农作物重金属含量特征分析[J].农业环境科学学报,2020,39(1):87-96.

[2] 邹晓锦,仇荣亮,周小勇,等.大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究[J].环境科学学报,2008(7):1406-1412.

[3] 陈旭飞,张池,高云华,等.蚯蚓在重金属污染土壤生物修复中的应用潜力[J].生态学杂志,2012,31(11):2950-2957.

[4] 陈绩,赵科理,柳丹,等.有机肥料联合东南景天修复重金属污染土壤的研究[J].环境污染与防治,2019,41(11):1346-1351.

[5] 阳雨平,杨田杰,陈国国.湘南某钨矿区土壤重金属污染评

- 价与植物修复研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5): 1752-1760.
- [6] 郭玲. 土壤重金属污染的危害以及防治措施[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(1): 123-125.
- [7] 王振中, 张友梅, 邓继福, 等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006(1): 23-38.
- [8] Huhta V. The role of soil fauna in ecosystems: A historical review[J]. Pedobiologia, 2007, 50: 489-495.
- [9] Leroy B L, van den Bossche A, De Neve S, et al. The quality of exogenous organic matter: Short-term influence on earthworm abundance[J]. European Journal of Soil Biology, 2007, 43: 196-200.
- [10] 徐芹, 肖能文. 中国陆栖蚯蚓[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [11] 张园, 肖祖飞, 李刚, 等. 蚯蚓-植物联合修复土壤重金属技术研究: 回顾与展望[J]. 环境化学, 2019, 38(11): 2510-2518.
- [12] Bouché M B. Lomriciens de France[M]. Ecologie et Systematique ED, 1972.
- [13] 刘子英, 刘保明, 薛进军, 等. 用蚯蚓处理农作物秸秆可行性研究[J]. 中国农学通报, 2004(4): 272-273.
- [14] Enami Y, Okano S, Yada H, et al. Influence of earthworm activity and rice straw application on the soil microbial community structure analyzed by PLFA pattern[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(4): 270-272.
- [15] 王丹丹, 李辉信, 胡锋, 等. 蚯蚓-秸秆及其交互作用对黑麦草修复 Cu 污染土壤的影响[J]. 生态学报, 2007(4): 1292-1299.
- [16] 卓少明. 3 种农业废弃物及其不同组合饲养蚯蚓试验[J]. 热带农业科学, 2003(6): 26-28.
- [17] 吴敏, 杨健. 蚯蚓生态床处理剩余污泥[J]. 中国给水排水, 2003(5): 59-60.
- [18] 吴世豪. 秸秆蚯蚓养殖技术[J]. 特种经济动植物, 2004(4): 5-6.
- [19] 张彬, 成晓英. 人工养殖赤子爱胜蚓中重金属及有害元素的测定[J]. 中国现代应用药学, 2017, 34(9): 1248-1251.
- [20] Schon N L, Mackay A D, Gray R A, et al. Influence of earthworm abundance and diversity on soil structure and the implications for soil services throughout the season[J]. Pedobiologia, 2017, 62: 41-47.
- [21] 李顺奇. 几种有机肥对紫色土壤中铅和镉有效性的调控效应[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [22] 刘波. 不同农作物秸秆配比对蚯蚓生长繁殖特性的影响及物料转化效率研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [23] 杨文霞. 城市有机混合垃圾和农业有机废弃物的蚯蚓堆制处理[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.

Effects of Organic Fertilizer on Earthworm Growth, Cd and Pb Absorption in Contaminated Soil

LIU Qian-liang¹, CHEN Xue-xue¹, JIAN Huai-liang¹, LUO Yang^{1,2}

(1. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China)

Abstract: In order to promote the remediation of heavy metal soils, using earthworm *Eisenia foetida* as experimental animal and straw, cow manure and sheep manure as organic fertilizer, the effects of organic fertilizer on earthworm growth and Cd, Pb uptake in compound polluted soil were studied by indoor inoculation method. The results showed that, under different treatment conditions, the order of earthworm quantity in polluted soil was straw > sheep manure > cow manure > CK (without adding organic fertilizer), and there was less fecundity when applying straw organic fertilizer; the order of average weight of earthworm was straw > cow manure > sheep manure > CK; compared with the control, the Cd content in earthworm decreased by 84.60% after adding cow manure, sheep manure and straw. The content of Pb in earthworm decreased by 16.53%, 15.04% and 4.17%, respectively. After the experiment, the order of soil available Cd and Pb content was CK > sheep manure > cattle manure > straw. Compared with the control, the concentration of soil available Cd and Pb in straw treatment group decreased by 1.45 and 430.35 mg·kg⁻¹, respectively. Therefore, straw fermented organic fertilizer is more suitable for the growth of earthworm, which is conducive to the accumulation of heavy metals Cd and Pb.

Keywords: heavy metal; organic fertilizer; earthworm