

蚯蚓-秸秆及其交互作用对黑麦草修复 Cu 污染土壤的影响

王丹丹 李辉信 胡 锋* 王 霞

(南京农业大学资源与环境科学学院 南京 210095)

摘要 :以高沙土为供试土壤 ,加入 Cu^{2+} 以模拟成 0 ,100 ,200 ,400 mg/kg Cu^{2+} 的 Cu 污染土壤 ,设置接种蚯蚓 (E)、表施秸秆 (M) ,同时加入蚯蚓和秸秆 (ME)及不加蚯蚓和秸秆的对照 (CK)4 个处理 ,并种植黑麦草。研究蚯蚓、秸秆相互作用对黑麦草吸收、富集铜的影响。结果表明 ,加入秸秆显著提高了蚯蚓的生物量 ,一定程度上缓解了重金属对蚯蚓的毒害 ,同时蚯蚓显著提高了秸秆的分解率 ,较无蚯蚓对照提高了 58. 11% ~ 77. 32% 。接种蚯蚓 (E ,ME)还提高了土壤有效态重金属 (DTPA-Cu)含量 ,秸秆处理 (M)则降低了土壤有效态重金属含量。研究还发现 ,E 处理促进了黑麦草地上部生长 ,而 M 和 ME 处理均显著提高了黑麦草下部的生物量。E 和 ME 处理同时提高了植物地上部和地下部的 Cu 浓度及 Cu 吸收量 ,M 处理则只对植物的地下部 Cu 浓度和 Cu 吸收量有显著促进作用。总体来看 ,E 处理、M 处理及 ME 处理分别使黑麦草地上部 Cu 富集系数提高了 31. 22% ~ 121. 07% ,2. 12% ~ 61. 28% 和 25. 56% ~ 132. 64% 。

关键词 蚯蚓 秸秆 ,Cu 污染 植物修复

文章编号 :1000-0933 (2007)04-1292-08 中图分类号 :S154 文献标识码 :A

Roles of earthworm-straw interactions on phytoremediation of Cu contaminated soil by ryegrass

WANG Dan-Dan , LI Hui-Xin , HU Feng* ,WANG Xia

College of Resources and Environmental Sciences , Nanjing Agricultural University , Nanjing 210095 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1292 ~ 1299.

Abstract : It is well known that the earthworm's activities can increase the availability of soil nutrients , improve soil structure , and enhance the biomass of plants in uncontaminated soil. Recently , many researchers found that some metal-tolerant earthworms can survive and even change the fractional distribution of heavy metals in contaminated soil. Furthermore , it has been revealed that earthworms are able to increase metal availability , and therefore , to accumulate more metals in plants through their burrowing and casting activities. It is clear that the influence of soil animals is an important factor on phyto-remediation that must be taken into account. We studied some effects of addition of earthworms (*Metaphire guillelmi*) , corn straw , and in combinations of earthworms and corn straw on the growth and Cu uptake by ryegrass in Cu contaminated pot soils. The experiment consisted of four levels of Cu addition (0 , 100 , 200 , 400 mg kg^{-1}) and four treatments. The treatments were 1. control (CK) ; 2. straw mulching only (M) ; 3. earthworm additions to soil only (E) ; and 4. straw mulching plus earthworm additions (ME). Each treatment had three replicates. 10 seeds of ryegrass (*Lolium*

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30370286)

收稿日期 2006-07-14 ; 修订日期 2006-12-13

作者简介 王丹丹 (1978 ~) ,女 ,河北石家庄人 ,博士生 ,主要从事土壤污染生态恢复研究. E-mail :ddw_njau@yahoo. com. cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :fhjwc@njau. edu. cn

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 30370286)

Received date 2006-07-14 ; **Accepted date** 2006-12-13

Biography :WANG Dan-Dan , Ph. D. candidate , mainly engaged in phytoremediation of contaminated soil. E-mail :ddw_njau@yahoo. com. cn

multiflorum) were sowed in each pot and harvested after 30 days.

After 30 days incubation , all earthworms were alive and the pot soils were burrowed through by earthworms. Results showed that the biomass of earthworm declined with the increase of the dosage of Cu additions. The biomass of earthworm increased significantly in treatment 4 (ME) as compared it with treatment 3 (E). Not only the earthworms could get more food from the straw , but also could counteract some negative effects of Cu on the earthworms. The rates of straw decomposition in ME treatment were increased about 58.11% – 77.32% . The earthworm activities increased root biomass of ryegrass significantly , but did not show the effect on plant root growth. On the contrary , straw enhanced roots biomass significantly instead of shoots biomass.

We also found Cu concentration in the plant shoot and the plant root , as well as plant Cu uptake were enhanced by earthworm’s activities and straw mulching. The increased amount by straw mulching was lower than that of earthworms (E) treatment. The treatment of the earthworm-straw mulching combinations enhanced plant Cu concentration , and the amount increased by it was lower than that of the earthworm treatment (E) but higher than that of straw mulching treatment (M). The accumulation factors of copper in the shoots of ryegrass were increased by 31.22% – 121.07% 2.12% – 61.28% and 25.56% – 132.64% , respectively , in treatment 3 (E) , 2 (M) , and 4 (ME). In conclusion , the earthworm activities , straw-mulching and their interactions may have potential roles in elevating phyto-extraction efficiency in low to medium level Cu contaminated soil.

Key words : earthworm ; straw ; copper contamination ; phytoremediation

土壤的重金属污染与治理一直是土壤环境科学的热点和难点问题。植物提取修复技术在土壤污染治理方面具有极大的潜力 ,已引起广泛关注^[1~3]。但现在发现的许多超积累植物通常生长缓慢、植株矮小、地上部生物量小 ,极大地限制了植物提取修复的实际效率^[4] ,因此提高超积累植物的地上部生物量和吸收量是提高植物修复效率的关键。近年来 ,蚯蚓在污染土壤中的应用开始受到重视 ,研究表明某些蚓种对土壤重金属污染有一定的耐性^[5,6] ,并可通过肠道消化和养分富集等过程提高污染土壤的有效养分及重金属元素的有效性^[7,8] ,从而促进了植物对重金属的吸收^[9~11]。Y. Ma 等研究蚯蚓对 Pb、Zn 尾矿土壤的影响 ,结果表明有效态 Pb、Zn 含量分别提高了 48.2% 和 24.8%^[12] ,同时污染土壤的各种有效态养分、植物生物量和植物体重金属浓度也有相应的提高^[9]。因外源有机物与重金属作用的复杂性^[13~15] ,上述研究过程均未投加蚯蚓生长所需的食物——有机物料^[16] ,但是没有外源有机物的施入 ,土壤中可供蚯蚓食用的有机物料不能满足蚯蚓生长活动的需要 ,致使蚯蚓鲜重在培养过程中有所降低^[10] ,活性也因此受到一定的影响。若要蚯蚓成功的应用于重金属污染土壤的植物修复 ,蚯蚓不仅要有增加植物产量和提高重金属生物有效性的作用 ,还应在重金属污染土壤中有良好的生长活力和繁殖能力。因此 ,本文着重研究了有机物料存在条件下蚯蚓的生长状况及秸秆-蚯蚓相互作用对于植物修复效率的影响 ,为进一步完善蚯蚓-植物修复技术 ,了解蚯蚓修复重金属污染土壤机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤的采集

供试土壤采自江苏如皋县搬经镇长江冲积物形成的高沙土 (0 ~ 20cm) ,质地为砂壤 ,土壤的基本性状为 : pH 值 8.15 ,总有机碳 5.18g/kg ,全 N 0.70g/kg ,全 P 0.66g/kg ,全 Cu 12.31mg/kg ,有效态 Cu 0.78mg/kg。供试蚯蚓为土壤原采样地获得的优势种威廉腔环蚓 (*Metaphire guillelmi*) ,供试植物为黑麦草 (*Lolium multiflorum*)。

1.2 铜污染土壤的制备

称取 1kg 过 2mm 筛的高沙土 (风干土)于 10 × 15cm 塑料盆钵中 ,加入 CuSO₄ (分析纯)以制成不同浓度的 Cu 污染土壤。设置 4 个 Cu 污染水平 0、100、200、400mg/kg Cu²⁺ (Cu-0、Cu-100、Cu-200、Cu-400) ,每个水平 3 次重复 ,置于 28℃ 温室中干湿交替培养 2 个月 ,使重金属各形态在土壤中分配达到平衡。

1.3 盆栽试验

上述污染土壤达到平衡后,每个 Cu 浓度水平设对照 (CK)、表施秸秆 (M)、接种蚯蚓 (E)、同时加蚯蚓和秸秆 (ME) 4 个处理,每个处理重复 3 次。施入秸秆处理:秸秆风干后粉碎,过 2m 筛,每 1kg 土壤表施 20g。接种蚯蚓处理:每 1kg 土壤接种蚯蚓 $8\text{g} \pm 0.02\text{g}$ (6 条),同时加蚯蚓和秸秆的处理:每钵接种蚯蚓 $8\text{g} \pm 0.02\text{g}$ (6 条)后再表施 20g 粉碎、过筛的玉米秸秆。加入蒸馏水使土壤水分达田间持水量的 60%。2d 后,播入黑麦草种子,植物生长一周后间苗,每钵留苗 10 株,植物生长 30d 后收获,沿土面剪取地上部,测量植株鲜重,同时洗出根系,在 105℃ 下杀青 0.5h 后 70℃ 烘干,称地上部和根的干重。培养结束后,手拣法取出盆钵中的蚯蚓,蚯蚓体用蒸馏水冲洗干净后,黑暗恒温 (15℃) 条件下,于铺有湿润滤纸的培养皿中培养 24h,清空其肠道内容物后称重。施入秸秆的各盆钵中未分解的秸秆用镊子挑出,风干并称重以计算秸秆分解率。

1.4 分析方法

土壤全量铜用王水-高氯酸消化、原子吸收分光光度法测定,植株中铜采用硝酸-高氯酸消化、原子吸收分光光度法测定;土壤有效态铜含量采用 DTPA 浸提、原子吸收分光光度法测定^[7],其它指标测试均采用常规方法。数据用 spss 软件进行统计分析,用 Duncan 法分析不同处理间的差异,显著性定义为 $p < 0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 加入蚯蚓对秸秆分解率的影响

秸秆以表施方式加入土壤中,培养 1 个月后,单施秸秆处理 (M) 的秸秆分解率平均为 58.50%,秸秆分解率随土壤污染浓度增加而降低,从 63.25% 下降到 44.97% (表 1)。接种蚯蚓后,土壤表面的秸秆几乎全部消失,在土壤下层有秸秆碎屑发现,说明蚯蚓将秸秆拖到土壤下层取食,或取食后排泄于土壤下层。接种蚯蚓后,秸秆分解率仍受重金属污染浓度影响,在 Cu-400 处理中秸秆分解率为仅为 76.38%,这可能是高浓度 Cu 污染下,蚯蚓的活性受到抑制,对秸秆的取食量减少。相同 Cu 浓度处理,接种蚯蚓后秸秆分解率明显提高,较单施秸秆处理 (M) 比,秸秆分解率提高了 58.11% ~ 77.32%。

表 1 蚯蚓对秸秆分解率的影响
Table 1 Effects of earthworm on straw decomposition rate

处理 Treatments	秸秆剩余量 Residual amount (g)				秸秆分解率 Straw decomposition rate (%)			
	Cu-0 *	Cu-100	Cu-200	Cu-400	Cu-0	Cu-100	Cu-200	Cu-400
表施秸秆 M	7.35a	8.30a	8.75a	11.01a	63.25b	58.50b	56.24b	44.97b
加蚯蚓和秸秆 ME	0.00b	0.17b	0.06b	4.72b	100.00a	99.13a	99.72a	76.38a

用方差分析统计,同列若有相同字母表示 M 与 ME 处理之间无显著性差异 ($p > 0.05$),下同。Figures within one column followed by the same letter are not significantly ($p > 0.05$) different ($n = 3$); the same below; M 表示表施秸秆的处理,ME 表示同时加入蚯蚓和秸秆的处理。M soil only with straw mulch; ME soil with straw mulch and earthworms; * Cu-0、Cu-100、Cu-200、Cu-400 表示土壤 Cu 污染浓度分别为 0、100、200、400 mg/kg,下同。Cu-0, Cu-100, Cu-200, Cu-400 respectively means soil Cu concentration is 0, 100, 200, 400 mg/kg, the same below.

2.2 施入秸秆对 Cu 污染土壤中蚯蚓生长的影响

在整个试验培养过程中,蚯蚓活性良好,蚯蚓作用的土壤孔洞明显,土壤表面有明显蚓粪堆积,但蚓粪量随 Cu 污染浓度的增加而减少,说明所选用的威廉腔环蚓 (*Metaphire guillelmi*) 对 Cu 有一定的耐受性,但 Cu 污染浓度不可过高。培养结束后,只接种蚯蚓处理 (E) 的蚯蚓鲜重均比培养前显著降低 (表 2),出现负增长,随 Cu 污染浓度增加,蚯蚓鲜重下降趋势明显,生长率从 -15.00% 降至 -43.13%,表明重金属污染对蚯蚓有毒害作用。秸秆对蚯蚓生长有明显促进作用,ME 处理的蚯蚓生物量较接种前明显增加,只在 Cu-400 出现负增长, T 检验表明接种前后蚯蚓鲜重间差异显著 ($p < 0.05^*$)。相同 Cu 污染水平下,ME 处理的蚯蚓生物量较 E 处理的蚯蚓生物量显著提高,这显示施入有机物料有利于污染土壤中蚯蚓的生长。

2.3 蚯蚓、秸秆的交互作用对污染土壤中黑麦草生长的影响

无污染土壤中,蚯蚓改善土壤物理、化学性状,促进植物生长的作用已经广有报道^[18,19],最新研究证实蚯

蚓在污染条件下对植物生长也有促进作用^[9,10]。表 3 可以看出:对照 (CK)和加秸秆 (M)处理的黑麦草地上部生物量与土壤 Cu 污染浓度呈负相关,随污染浓度增大而降低。加蚯蚓 (E)、同时加秸秆和蚯蚓 (ME)两个处理的黑麦草地上部生物量大小不受污染浓度抑制。E 处理的黑麦草地上部生物量较对照显著提高,达到极显著水平 ($p < 0.01^{**}$),而施入秸秆处理 (M、ME)的地上部生物量和对照处理间没有显著差异。但是施入秸秆对植物地下部生物量有显著促进作用 (表 3),M、ME 处理的根生物量均显著提高,蚯蚓处理则对地下部生物量没有显著影响。总体来看,黑麦草地下部生物量为:ME \approx M $>$ E \approx CK。

表 2 秸秆加入对蚯蚓生长的影响

Table 2 Effects of straw on earthworm growth

处理 Treatments	项目 Items	蚯蚓鲜重 Earthworm fresh weight (g)			
		Cu-0	Cu-100	Cu-200	Cu-400
加蚯蚓 E	培养前 (g/pot) ^①	8.02a	8.01a	8.02a	7.99a
	培养后 (g/pot) ^②	6.80b	6.32b	5.69b	4.55b
	蚯蚓生长率 (%) ^③	-15.00	-22.50	-28.88	-43.13
加蚯蚓和秸秆 ME	培养前 (g/pot)	7.98b	8.01b	8.03b	7.97b
	培养后 (g/pot)	9.50a	10.58a	10.60a	7.48a
	蚯蚓生长率 (%)	18.75	32.25	32.50	-6.50

① Earthworms weight before incubation ; ② Earthworms weight after incubation ; ③ Growth rate of earthworm

通过方差分析发现 (见表 3) 蚯蚓因子对植物地上部干重贡献极显著,但是对根干重贡献不显著,而秸秆因子和铜因子对地上部、根干重均有显著影响。在 3 个主效应中,秸秆因子对植物生物量的贡献最大,蚯蚓因子次之。对植物地上部生物量而言,3 因子彼此之间都存在显著的交互作用,秸秆 \times 蚯蚓的交互作用在交互效应中贡献率最大,而对根生物量而言,仅秸秆 \times 铜浓度的交互作用达到显著水平。

表 3 蚯蚓-秸秆相互作用对黑麦草地上部、地下部生物量的影响

Table 3 Effects of earthworm and straw on shoot and root biomass of ryegrass

处 理 Treatments	黑麦草生物量 Biomass of ryegrass (g/pot)							
	Cu-0		Cu-100		Cu-200		Cu-400	
	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root
对照 CK	2.40b	0.85a	1.87b	0.71b	1.40b	0.67b	1.23b	0.33b
加秸秆 M	2.00b	1.10a	1.80b	1.27a	1.50b	1.61a	1.30ab	0.71a
加蚯蚓 E	3.97a	1.17a	2.40a	0.67b	2.83a	0.68b	2.67a	0.45b
加蚯蚓和秸秆 ME	1.20c	1.02a	1.60b	1.18a	2.10b	1.19a	1.93ab	0.84a

变异来源 Variation source	地上部干重 Shoot biomass			地下部干重 Root biomass		
	df	F	Sig.	df	F	Sig.
铜浓度 Cu contents (Cu)	3	7.31	0.00***	3	4.04	0.003*
秸秆 Straw (S)	1	45.67	0.000***	1	468.71	0.000***
蚯蚓 Earthworm (E)	1	27.77	0.00***	1	25.83	0.994
S \times E	1	30.65	0.00***	1	0.00	0.166
S \times Cu	3	8.3	0.00***	3	6.13	0.029*
E \times Cu	3	3.41	0.03*	3	2.03	0.413
S \times E \times Cu	3	1.9	0.16	3	3.52	0.744

、、*、*、* 分别代表显著水平 $p \leq 0.001, 0.01, 0.05$,下同 Express significant difference at $p \leq 0.001, 0.01, 0.05$ respectively ; the same below CK 表示对照处理 ; M 表示表施秸秆处理 ; E 表示加蚯蚓的处理 ; ME 表示同时加入蚯蚓和秸秆的处理 CK control treatment ; M soil only with straw mulch ; E soil only with earthworms ; ME soil with straw mulch and earthworms

2.4 蚯蚓、秸秆的交互作用对黑麦草地上、地下部 Cu 浓度的影响

黑麦草地上部、地下部 Cu 含量均随着土壤中 Cu 浓度的提高而增加,且地下部 Cu 含量远高于地上部,同

时黑麦草地上部、地下部 Cu 浓度均随蚯蚓和秸秆的加入而增加(表 4)。接种蚯蚓处理(E)的黑麦草地上部和地下部 Cu 含量较 CK 处理显著增加(Cu-0 处理除外);加入秸秆后,植物地上部 Cu 浓度有所提高,但只有 Cu400 mg/kg 处理达到显著水平,植物地下部 Cu 浓度除 200 mg/kg Cu 处理外,均较 CK 显著增加($p < 0.05^*$)。秸秆、蚯蚓同时加入后(ME),黑麦草各部分 Cu 浓度低于只加蚯蚓的处理,而高于其它两个处理。总体来讲,相同 Cu 浓度下,植物体 Cu 浓度为 $E > ME > M > CK$ 。

方差分析表明,铜浓度、蚯蚓因子对植物各部分 Cu 浓度的影响极其显著,秸秆因子仅对植物地上部浓度有影响。铜浓度对植物体重金属浓度的贡献最大,秸秆因子的贡献最小。对地下部铜浓度而言,三因子两两之间的交互作用都达到显著水平。

表 4 蚯蚓、秸秆对黑麦草地上、地下部 Cu 浓度的影响

Table 4 Effects of earthworm and straw on Cu concentrations in shoots and roots of ryegrass								
处 理 Treatments	黑麦草 Cu 浓度 Cu concentrations in ryegrass (mg/kg)							
	Cu-0		Cu-100		Cu-200		Cu-400	
	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root
对照 CK	8.97b	24.49b	12.01b	348.06d	25.40c	544.99c	52.98d	854.57d
加秸秆 M	9.16b	35.18a	19.37ab	446.67c	26.92c	576.66c	63.28c	1105.83c
加蚯蚓 E	12.68b	39.32a	26.55a	619.00a	34.73b	918.22a	69.52a	1312.50a
加蚯蚓和秸秆 ME	20.86a	35.21a	21.72a	536.59b	41.23a	771.70b	66.57b	1226.04b
变异来源 Variation source	地上部 Cu 浓度 Shoot Cu concentration			地下部 Cu 浓度 Root Cu concentration				
	<i>df</i>	<i>F</i> -value	Sig.	<i>df</i>	<i>F</i> -value	Sig.		
铜浓度 Cu contents (Cu)	3	227.56	0.00***	3	1250.61	0.000***		
秸秆 Straw (S)	1	4.64	0.04*	1	0.28	0.604		
蚯蚓 Earthworm (E)	1	42.20	0.00***	1	203.65	0.000***		
S × E	1	1.14	0.30	1	44.45	0.000***		
S × Cu	3	0.32	0.81	3	4.01	0.023*		
E × Cu	3	0.39	0.76	3	26.10	0.000***		
S × E × Cu	3	3.57	0.03*	3	6.51	0.003*		

2.5 蚯蚓、秸秆的交互作用对黑麦草 Cu 吸收量的影响

4 个处理相比,E 处理对植物地上部吸收量的促进作用最为明显(表 5)。整体来看,相同 Cu 浓度处理下,植物地上部 Cu 吸收量为 $E > ME > M > CK$ 。秸秆对植物地下部 Cu 吸收量的提高作用强于蚯蚓,其中 ME 处理的增幅最大。方差分析也表明秸秆因子对植物地下部吸收 Cu 量的影响较其对地上部的影响大,蚯蚓、铜浓度因子对植物各部分 Cu 吸收量均影响显著,且秸秆 × 蚯蚓的交互作用对地上部 Cu 吸收量也有显著影响。

从黑麦草对土壤中重金属的吸收富集能力来看(富集系数 E_f = 植物体内某元素的浓度 P_e /土壤中该元素的浓度 S_e),Cu 虽然在土壤中含量很高,但是黑麦草地上部的富集系数很低,平均为 0.11 ~ 1.69,4 个处理的 Cu 富集系数均在无污染条件下最大,高于 1.0,随土壤污染浓度增大而降低。加入蚯蚓和秸秆分别使黑麦草地上部 Cu 富集系数提高了 31.22% ~ 121.07%, 2.12% ~ 61.28%,同时加秸秆和蚯蚓处理对富集系数的提高值较只加蚯蚓处理的小而较单施秸秆处理的高,4 个处理的植物地上部富集系数为 $E > ME > M > CK$ 。

2.6 蚯蚓、秸秆的交互作用对土壤有效态 Cu 的影响

土壤 DTPA 态 Cu 是植物可利用态 Cu,与植物体 Cu 浓度有显著相关性^[20]。土壤 DTPA 态 Cu 随土壤污染浓度增加而增大,同 CK 处理比,接种蚯蚓提高了土壤 DTPA-Cu 量,除无污染土壤外,方差分析表明蚯蚓作用达到显著水平(图 1)。秸秆和蚯蚓同时加入对土壤 DTPA-Cu 的提高作用最为显著,相同 Cu 浓度时,较其它 3 个处理的都高。单施秸秆(M)则使土壤 DTPA-Cu 降低,低于 CK 的相应处理。总体来看,土壤 DTPA-Cu 含

量为 :ME > E > CK > M。相关分析表明无论是否加入蚯蚓 ,土壤 DTPA-Cu 的浓度均和植物地上部 Cu 浓度间有显著相关性 ($r = 0.934^{**}$)。

表 5 蚯蚓、秸秆对黑麦草地上、地下部 Cu 吸收量的影响

Table 5 Effects of earthworm and straw on total Cu uptake in shoots and roots of ryegrass

处理 Treatments	黑麦草 Cu 吸收量 Cu uptake in ryegrass (μg/pot)							
	Cu-0		Cu-100		Cu-200		Cu-400	
	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root
对照 CK	21.53b	20.82a	22.46b	247.12c	35.56c	365.14b	66.17d	282.01c
加秸秆 M	18.32b	38.70a	34.87b	567.27b	40.38bc	928.42a	82.26c	785.14b
加蚯蚓 E	50.34a	46.00a	63.72a	414.73c	98.29a	624.39ab	185.622a	590.63c
加蚯蚓和秸秆 ME	25.03b	35.91a	34.75b	633.18a	86.58ab	918.32a	128.48b	1029.87a

变异来源 Variation source	地上部 Cu 吸收量 Root Cu uptake			地下部 Cu 吸收量 Shoot Cu uptake		
	df	F-values	Sig.	df	F-values	Sig.
铜浓度 Cu contents (Cu)	3	73.64	0.000 ***	3	173.448	0.000 ***
秸秆 Straw (S)	1	8.34	0.009 *	1	142.831	0.000 ***
蚯蚓 Earthworm (E)	1	98.25	0.000 ***	1	46.712	0.000 ***
S × E	1	21.21	0.000 ***	1	4.477	0.049 *
S × Cu	3	0.45	0.717	3	18.315	0.000 ***
E × Cu	3	11.92	0.000 ***	3	6.706	0.003 *
S × E × Cu	3	1.79	0.178	3	0.854	0.484

3 讨论

研究结果表明 ,接种蚯蚓对土壤外源秸秆的分解有促进作用 ,这是因为有机物是蚯蚓的主要食源 ,蚯蚓通过吞食、过腹等过程对秸秆起到了分解、破碎作用 ,使秸秆颗粒变小 ,C/N 比降低 ,湿度增大 ,更容易被微生物侵染和繁殖^[21-22]。秸秆的加入显著提高了蚯蚓的生物量 ,一定程度上缓解了重金属对蚯蚓的毒害作用。原因可能是一方面秸秆分解物促进了土壤微生物数量提高^[23] ,为蚯蚓提供了更多的食源^[24] ;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。

总体来看 ,蚯蚓处理 (E)对植物地上部生物量有促作用 ,单施秸秆 (M)则对植物地下部生长有提高作用 ,而对地上部影响不大。同时加蚯蚓和秸秆处理 (ME)主要表现出对地下部生物量的促进 ,而对地上部生物量的作用受土壤 Cu 污染浓度大小影响。ME 处理的植物地上部生物量低于相应的 E 处理 ,这可能是由于 :①秸秆的 C/N 比较高 ,分解过程消耗了大量矿质态氮 ,使土壤有效态氮急剧减少 ,而土壤速效氮是植物生长的限制因子之一 ;②加入秸秆后 ,土壤微生物数量增多 ,更多有效态碳、氮被固定到微生物体中 ,发生微生物同植物根系抢夺养分的状况。相同 Cu 浓度下 ,黑麦草地下部生物量为 ME ≈ M > E ≈ CK。这和 Derouard 等^[25]研究结果一致 ,他们研究了 4 种蚯蚓对 3 种作物的影响 ,发现几种蚯蚓都提高了玉米的地上部产量 ,却使玉米根量降低。方差分析也表明蚯蚓因子对地上部干重贡献显著 ,秸秆因子对地下部干重影响较地上部大。

接种蚯蚓对植物地上部、地下部 Cu 浓度均有显著提高 ,且提高作用强于秸秆。与对照处理相比 ,单施秸秆显著提高了植物地下部 Cu 浓度 ,而对地上部 Cu 浓度影响不大。表明秸秆能促进植物根系对 Cu 的吸收 ,但对 Cu 离子向植物地上部运移影响不大 ,蚯蚓则通过某些机理促进了铜离子在植物体内的运移。这可能是

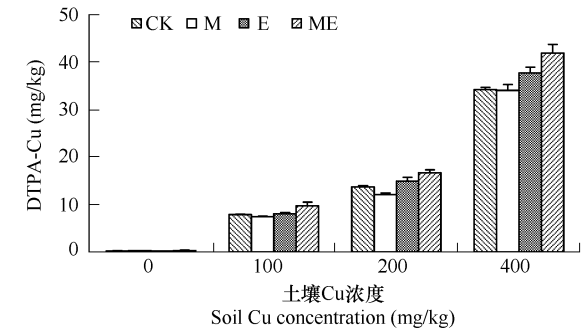


图 1 蚯蚓、秸秆对土壤有效态 Cu 浓度的影响

Fig. 1 Effects of earthworm and straw on soil DTPA-Cu concentration

秸秆分解物主要以大分子有机物为主,而蚯蚓分泌物或加入蚯蚓后土壤微生物的分泌物却以小分子有机物为主。例如,有研究发现蚯蚓体及蚓粪中富含氨基酸^[26],土壤中 DOC 等小分子有机物的含量也因接种蚯蚓而提高^[16],这些小分子有机物可伴随铜离子向地上部运移^[27],本试验中也发现蚯蚓活动增加了土壤 DOC 含量,但蚯蚓对土壤 DOC 的作用受土壤污染浓度影响(土壤 DOC 的数据未列出)。各处理下植物体 Cu 吸收量的数据表明,ME 处理对植物地上部 Cu 吸收的作用弱于 E 处理而高于 M 处理,而对根系 Cu 吸收的促进作用在几个处理中最强。整体来看,4 个处理的植物地上部富集系数为 E > ME > M > CK。

不同处理的土壤有效态铜 (DTPA-Cu)数据表明,单独施入秸秆 (M)对土壤 DTPA-Cu 影响不大,这可能是 M 处理中秸秆分解过程形成了腐殖质等大分子有机物,具有较大的比表面积,吸附了部分有效态 Cu 离子。蚯蚓和秸秆的交互作用 (ME)则显著促进了土壤有效态 Cu 量的提高,原因可能是加入蚯蚓后,秸秆在蚯蚓肠道消化、肠道微生物共同作用下分解产生的产物以小分子有机物居多,小分子有机物与 Cu 形成络合物,提高了土壤 Cu 的有效性^[28]。对 DTPA-Cu 和植物地上部、地下部 Cu 浓度的相关分析也表明,无论是否接种蚯蚓,土壤 DTPA-Cu 均和植物地上部 Cu 浓度间有显著相关性。

为何单独接种蚯蚓可提高植物产量和 Cu 吸收量,而同时加入蚯蚓和秸秆却使这种促进作用变弱?根据现有的资料推测,原因可能是施入的秸秆未经腐熟且 C/N 比较高,分解过程中强烈的生物固持作用而和植物抢夺蚯蚓矿化出来的有效态 N 素,从而影响了植物生长。但是秸秆对蚯蚓活性、生物量及土壤微生物群落数的提高作用是显著的。长远来看,随着秸秆的降解,它最终会增加土壤中各种养分的储量,其固持的养分迟早会释放出来,而逐渐被作物所利用。因此延长试验培养时间,秸秆的优势就可能表现出来。

References :

[1] Kumar P , Dushenkov V , Motto H , *et al.* Phytoextraction : the use of plant to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.* , 1995 , 29 : 1232 – 1238.

[2] Ebbs S D , Kochian L V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*) , barley (*Hordeum vulgare*) , and Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environ. Sci. Technol.* , 1998 , 32 : 803 – 806.

[3] Garbisa C , Alkorta I. Phytoremediation : a cost——effective plant – based technology for the remove of metals from the environment. *Bioresour. Technol.* , 2001 , 77 : 229 – 236.

[4] Brown S L , Chaney R L , Angle J S , *et al.* Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescenes* and bladder campion for zinc and cadmium-contaminated soil. *J. Environ. Qual.* , 1994 , 23 : 1151 – 1157.

[5] Ge F , Liu X H , Pan W D , *et al.* The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing copper mine in China. *Acta Ecologica Sinica* , 2001 , 21 (11) : 1790 – 1795.

[6] Cheng J M , Wong M H. Effects of earthworms on Zn fractionation in soils. *Biol. Fertil. Soils* , 2002 , 36 : 20 – 28.

[7] Devliegher W , Verstraete W. *Lumbricus terrestris* in a soil core experiment : effect of nutrient enrichment process (NEP) and gut-associated processed (GAP) on the availability of plant nutrient and heavy metals. *Soil Biol. Biochem.* , 1996 , 28 : 489 – 496.

[8] Dai J , Becquer T , Rouiller J H , Reversat G , *et al.* Heavy metal accumulation by two earthworm species and its relationship to total and DTPA-extractable metals in soils. *Soil Biol. Biochem.* , 2004 , 36 : 91 – 98.

[9] Ma Y , Dickinson N M , Wong M H. Interactions between earthworms , trees , soil nutrition and metal mobility in amended Pb/Zn mine tailings from Guangdong , China. *Soil Biol. Biochem.* , 2003 , 35 : 1369 – 1379.

[10] Cheng J M , Yu X Z , Huang M H. Roles of earthworm-mycorrhiza interactions on phytoremediation of Cd contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica* , 2005 , 25 (6) : 1256 – 1263.

[11] Yu X Z , Cheng J M. Effect of earthworm on bio-availability of Cu and Cd in soil. *Acta Ecologica Sinica* , 2003 , 23 (5) : 922 – 928.

[12] Ma Y , Dickinson N M , Wong M H. Toxicity of Pb/Zn mine tailings to the earthworm *Pheretima* and the effects of burrowing on metal availability. *Biol. Fertil. Soils* , 2002 , 36 : 79 – 86.

[13] Wang Y M , Zhou L X. The dynamics of dissolved organic matter and associated water soluble Cu in two Cu contaminated soils amended with various organic matters. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2003 , 23 (4) : 452 – 457.

[14] Lu X H , Li C H , Tu C L. Effect of different organic matters on the availability of added Cu in two soils. *Journal of Mountain Agriculture and*

Biology ,2004 ,23 (1) :5 -9.

[15] Chen S J. Effect of organic substances on plant growth in copper contaminated soils. Rural Eco. Environ. ,2001 ,17 (1) :37 -39.

[16] Wen B ,Hu X Y ,Liu Y ,*et al.* The role of earthworms (*Eisenia fetida*) in influencing bioavailability of heavy metals in soils. Biol. Fertil. Soils ,2004 ,40 :181 -197.

[17] Lu R K ,ed. Method of analysis in soil and agrochemistry. Beijing :Chinese Agriculture Science and Technology Press 2000.

[18] Li H X ,Hu F ,Shen Q R ,*et al.* Effect of earthworm inoculation on soil carbon and nitrogen dynamics and on crop yield with application of corn residues. Chinese Journal of Applied Ecology ,2002 ,13 (12) :1637 -1641.

[19] Brown G G ,Edwards C A ,Brussaard L. How earthworms affect plant growth :burrowing into the mechanisms. In :Edwards C A ed. Earthworm ecology. CRC Press ,2004. 14 -37.

[20] Lindsay WL ,Norvell ,WA. Development of DTPA soil test for zinc ,iron ,manganese ,and copper. Soil Sci. Soc. Am. J ,1978 ,42 :421 -428.

[21] Scullion J ,Malik A. Earthworm activity affecting organic matter ,aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal. Soil Biol. Biochem. ,2000 ,32 :119 -126.

[22] Edwards C A ,Fletcher K E. Interactions between earthworms and microorganisms in organic matter breakdown. Agric. Ecosyst. Environ. ,1988 ,24 :235 -247.

[23] Enami Y ,Okano S ,Yada H ,*et al.* Influence of earthworm activity and rice straw application on the soil microbial community structure analyzed by PIFA pattern. Eur. J. Soil Biol. ,2001 ,37 :269 -272.

[24] Wolters V ,Scheu S. Changes in bacterial numbers and hyphal lengths during the gut passage through *Lumbricus terrestris* (Lumbricidae ,Oligochaeta). Pedobiologia ,1999 ,43 :891 -900.

[25] Derouard L ,Tondoh J ,Vilcosqui L ,*et al.* Effects of earthworm introduction on soil processes and plant growth. Soil Biol. Biochem. ,1997 ,29 :541 -545.

[26] Pokarzhevskii A D ,Zaboyev D P ,Ganin G N ,*et al.* Amino acids in earthworms :are earthworms ecosystemivorous ?Soil Biol. Biochem. ,1997 29 :559 -567.

[27] Rauser W E. Structure and function of metal chelators produced by plants :the case for organic acids ,amino acids ,phytin and metallothioneins. Cell Biochem Biophys ,1999 ,31 :19 -48.

[28] Christensen J B ,Jensen D L ,Christensen T H. Effect of dissolved organic carbon on the mobility of cadmium ,nickel and zinc in leachate polluted groundwater. Wat. Res. ,1996 ,30 :3037 -3049.

参考文献：

[5] 戈峰 ,刘向辉 ,潘卫东 等. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用. 生态学报 ,2001 ,21 (11) :1790 ~1795.

[10] 成杰民 ,俞协治 ,黄铭洪. 蚯蚓-菌根在植物修复镉污染土壤中的作用. 生态学报 2005 ,25 (6) :1256 ~1263.

[11] 俞协治 ,成杰民. 蚯蚓对土壤中铜、镉生物有效性的影响. 生态学报 2003 ,23 (5) :922 ~928.

[13] 王艮梅 ,周立祥. 施用有机物料对污染土壤水溶性有机物和铜活性的动态影响. 环境科学学报 ,2003 ,23 (4) :452 ~457.

[14] 陆晓辉 ,黎成厚 ,涂成龙. 不同有机物料对土壤外源铜有效性的影响. 山地农业生物学报 ,2004 ,23 (1) :5 ~9.

[15] 陈世俭. 污染土壤添加有机物质对黑麦草吸收铜的影响. 农村生态环境 ,2001 ,17 (1) :37 ~39.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京 :中国农业科技出版社 2000.

[18] 李辉信 ,胡锋 ,沈其荣 等. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤 C ,N 动态和作物产量的影响. 应用生态学报 ,2002 ,13 (12) :1637 ~1641.