

蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响*

林淑芬 李辉信 胡 锋[†]

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 在长江冲积物形成的高沙土中加入 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 模拟土壤污染, 使 Cu 污染浓度分别为 200、400、600 mg kg^{-1} , 并设置加蚓粪(15%)和加原土(15%)处理, 二处理各设种植黑麦草(*Lolium multiflorum*)和不种黑麦草培养试验, 研究蚓粪对黑麦草生长及对 Cu 吸收的影响, 以揭示蚓粪在 Cu 污染土壤植物修复中的作用。结果表明: 蚓粪显著增加了黑麦草的地上部和地下部的生物量($p < 0.001^{**}$)以及根系的长度、表面积、体积和根尖数($p < 0.05^*$), 在 Cu 浓度为 200 mg kg^{-1} 时促进作用最大; 蚓粪还显著提高了黑麦草地上部 Cu 的浓度及累积量, 但显著降低了地下部的 Cu 浓度($p < 0.05^*$), 而对地下部的铜累积量没有影响, 显示蚓粪能促进 Cu 从根系向地上部的运移及在地上部的富集。通过对土壤的 pH 和 Cu 的形态特征分析, 发现种植黑麦草处理降低了土壤的 pH 并增加了可交换态铜的含量, 而且这种作用在加入蚓粪后更加明显。推测蚓粪主要通过促进黑麦草根系的生长和活性而影响根系周围环境, 提高重金属铜的生物有效性进而增加植物对铜的吸收。

关键词 蚓粪; 重金属铜; 黑麦草; 根系; pH; BCR 连续提取

中图分类号 X53

文献标识码 A

随着工农业生产的发展和人口的增加, 环境污染日益严重。土壤重金属污染已相当普遍, 最令人担忧的是, 重金属可以通过土壤)植物途径进入食物链并大量累积危害人类健康。在土壤)植物系统中, 植物对重金属的积累能力和生物毒性不仅与重金属的种类和总量、土壤的类型与土壤环境有关, 还与植物吸收重金属紧密相关的根际环境有关。研究资料显示, 根际环境状况直接影响重金属在土壤)植物系统中的迁移与转化^[1, 2]。

蚓粪是蚯蚓吞食土壤通过蚯蚓肠道消化后的排泄物。蚓粪具有很好的通气性、透水性和持水性以及良好的养分供应与保持能力, 有利于增加植物生物量^[3, 4]和植物氮素的吸收^[4]、提高土壤微生物数量与活性、抑制植物土传病害^[5]。与人工合成肥料相比, 还有减少养分渗漏、植物盐离子胁迫的优点^[6]。蚓粪对植物生长特别是对根系生长的促进作用十分明显, 因为蚓粪含有丰富的促进根系发育和生长的激素如 IAA^[7]等。所以蚓粪在土壤)植物生态系统特别是对根际环境的重要作用不容忽视。

近年来蚯蚓对污染土壤系统的影响及在植物

修复中的作用已引起关注^[8-11], 但遗憾的是关于蚓粪对污染土壤重金属生物有效性及对植物吸收重金属的影响却少有报道。尽管重金属对蚯蚓产生一定的毒害作用, 但俞协志等观察到在铜污染浓度为 400 mg kg^{-1} 时环毛蚓(*Pheretima sp1*)的生长情况良好, 未有死亡现象^[12]。也有报道表明, 猪粪条件下蚯蚓的半致死铜浓度为 64617 mg kg^{-1} ^[13]。而且即使在污染地区也存在着某些蚯蚓的优势种^[14]。所以本研究通过培养试验主要研究蚓粪对黑麦草生长、黑麦草对铜吸收和富集、以及土壤 pH 和土壤铜形态分布的影响, 为认识和发挥蚓粪在重金属污染土壤植物修复中的潜力与作用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和蚓粪

供试土壤采自江苏省如皋市长江冲积物形成的高沙土的耕层土壤(0~20 cm), 风干, 过 10 目筛。蚓粪采自南京国际关系学院未经人为扰动的水杉林内, 经鉴定为环毛蚓(*Pheretima sp1*)的蚓粪, 采集后

* 国家自然科学基金项目(30370286)

† 通讯作者, E-mail: fhjwc@njau.edu.cn

作者简介: 林淑芬(1980~), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤污染生态修复方面的研究

收稿日期: 2005-08-15; 收到修改稿日期: 2005-11-10

充分混匀, 冰箱 4 e 保存。同时在蚓粪周围采集原土, 混匀、风干, 过 10 目筛。供试土壤、蚓粪以及原土的基本性质见表 1。

表 1 供试土壤、蚓粪和原土的性质

Table 1 Basic properties of soil, earthworm casts and background soil for pot test

	pH (H ₂ O)	有机碳 Organic C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium N (mg kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate N (mg kg ⁻¹)	全铜 Total Cu (mg kg ⁻¹)	有效铜 Available Cu (mg kg ⁻¹)
高沙土 Orthic aquisol	8.67	5186	0.536	31.62	11981	21.31	0.78
蚓粪 Earthworm casts	7.50	30171	11.758	161.68	71.48	221.55	0.60
原土 Background soil	7.38	11189	0.621	81.47	31.95	191.01	0.58

113 试验处理与设计

11311 污染土壤的准备 有学者发现春小麦产量减少 10% 的土壤铜浓度为 200 mg kg⁻¹, 认为该浓度可作为土壤毒性的临界值^[15], 且考虑到试验时所添加的蚓粪或原土/稀释 0 了污染土壤的铜浓度, 对植物的毒性有所下降, 故本实验直接以铜浓度 200 mg kg⁻¹ 作为浓度间隔。高沙土风干过后加入 CuSO₄·5H₂O, 使土壤 Cu 污染浓度分别为 200、400、600 mg kg⁻¹, 干湿交替法平衡 2 个月。

11312 试验设计 设每个盆钵的干土重量 500 g, 按干重分别取 4 个 Cu 污染水平 (0、200、400、600 mg kg⁻¹) 的模拟污染土壤的 85% (425 g) 装入塑料盆钵内, 并添加 15% 的蚓粪 (75 g), 以添加 15% 的原土作对照。污染土壤与蚓粪或原土充分混合后, 从底部承水盘加入去离子水 120 ml, 湿润土壤。黑麦草种子在 25 e 培养箱中催芽 3 d, 挑选根长约 1 cm 的萌发种子移入盆钵内, 每盆 15 棵, 5 d 后间苗, 每盆剩 9 棵。同时设不种植黑麦草对照。所有处理均为 3 个重复。盆钵置于培养室中培养, 温度白天 25 ± 3 e, 晚上 18 ± 3 e, 每天光照 10 h。培养期间定时浇入去离子水, 水分保持在最大田间持水量的 70%, 以保证黑麦草的正常生长。45 d 后破坏性取样。

114 测定方法

土壤 pH、有机质、土壤全氮、土壤铵态氮、硝态氮的测定参照文献 [16]; 土壤全铜用王水) 高氯酸消煮、原子吸收分光光度法测定^[16]; 土壤有效态铜用 DTPA 浸提、原子吸收分光光度法测定^[16]; 植株全铜用硝酸) 高氯酸消煮、原子吸收分光光度法测定^[16]; 土壤铜形态用 BCR (Community Bureau of Reference) 连续提取法, 参照 Ure^[17] 和 Rauret^[18] 并作

112 供试作物

意大利黑麦草 (*Lolium multiflorum*), 宽叶型, 一年生, 购自江苏省农业科学院。

部分修改。植物根系指标包括根系长度、根表面积、根体积和根尖数用根系分析系统测定 (WinRHIZO A1600+, Regent Instruments Inc1)。

115 统计方法

用 SPSS 统计软件 LSD 法分析所得数据, 并对典型变量和处理之间进行回归分析。

2 结果

211 蚓粪对黑麦草生长的影响

与原土相比, 蚓粪明显增加了黑麦草地上部和地下部的生物量, 而且地上部的增幅比地下部的显著 (图 1、图 2)。如黑麦草地上部干重, 土壤铜浓度在 200、400、600 mg kg⁻¹ 时蚓粪处理比原土处理分别增加了 621.6%、461.7% 和 751.3%, 都达到了显著水平 ($p < 0.05$)。另外, 无论是蚓粪或原土处理, 黑麦草地上部和地下部的生物量都在铜污染 200 mg kg⁻¹ 时达到最大值, 但随着污染水平的升高, 生物量逐渐下降, 但是地上部的下降趋势没有地下部的下降趋势明显。尽管蚓粪处理的地上部干重随污染浓度的升高而呈现下降趋势, 但最高污染浓度 600 mg kg⁻¹

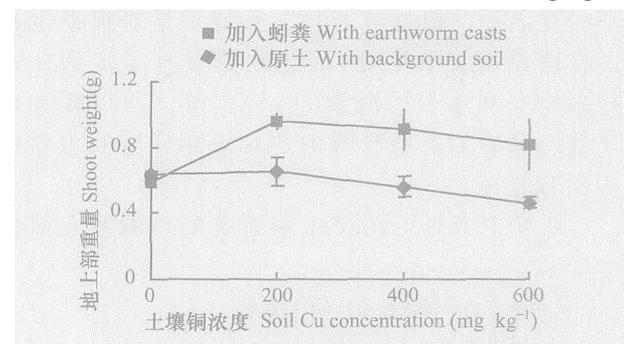


图 1 蚓粪对黑麦草地上部干重的影响
Fig 1 Effect of earthworm casts on shoot dry weight

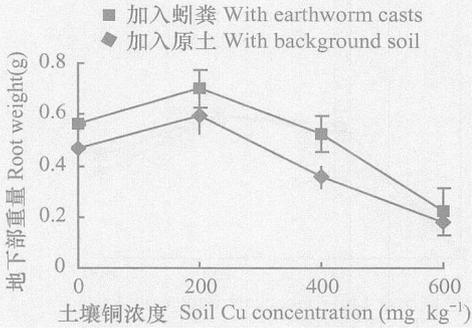


图2 蚓粪对黑麦草地下部干重的影响
Fig 2 Effect of earthworm casts on root dry weight

时的生物量仍然比对照还增加了 3917%，而加入原土后的最高浓度比对照下降了 1217%。

蚓粪对黑麦草根系性状也有明显影响。通过根系分析仪对根系的各项指标包括根系长度、根表面积、根体积和根尖数的分析(图3)进一步证实了蚓粪对根系生长的影响。从图3可以看出, 蚓粪显著促进了根系各项指标的生长, 与地下部生物量的生长情况一样, 无论是蚓粪或原土处理黑麦草根系的各项指标都在铜污染 200 mg kg⁻¹时达到最大值, 但随着污染水平的升高, 根系各指标的数值逐渐下降。

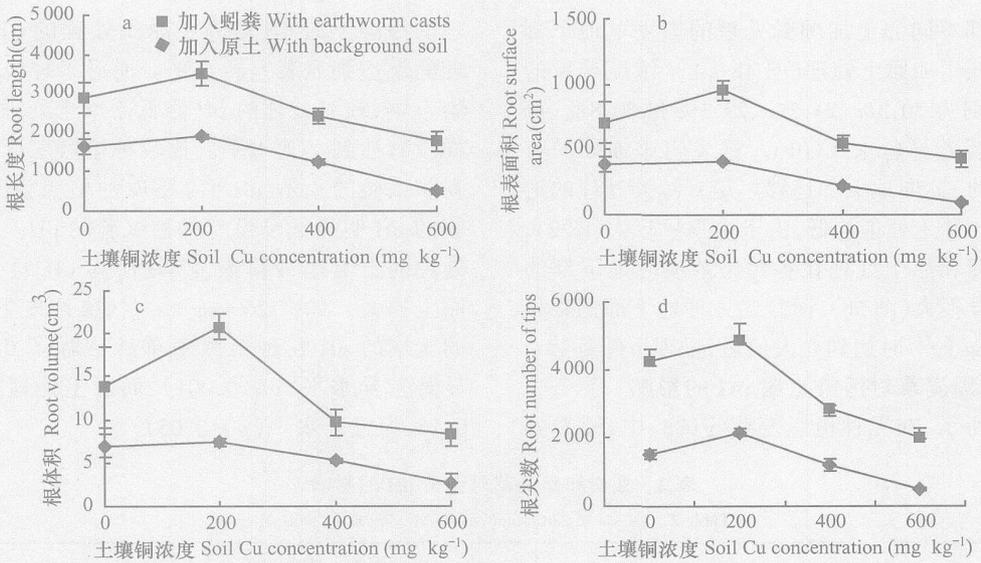


图3 蚓粪对黑麦草根系性状的影响(aI 根长度; bI 根表面积; cI 根体积; dI 根尖数)

Fig 3 Effects of earthworm casts on root s characters(aI Length; bI Surface area; cI Volume; dI Number of tips)

212 蚓粪对黑麦草吸收铜的影响

图4a结果显示, 蚓粪处理的黑麦草地上部铜浓度明显高于原土处理, 与原土相比, 蚓粪处理中4个Cu浓度时的增幅分别为2617%、7516%、3912%和3312%, 都达极显著差异水平(p <

01001)。由于蚓粪处理的黑麦草地上部生物量和铜浓度均显著高于原土处理, 所以蚓粪处理的地上部铜累积量也显著高于原土处理, 且在不同污染浓度处理时均达到极显著水平(p < 01001)(如图5a所示)。

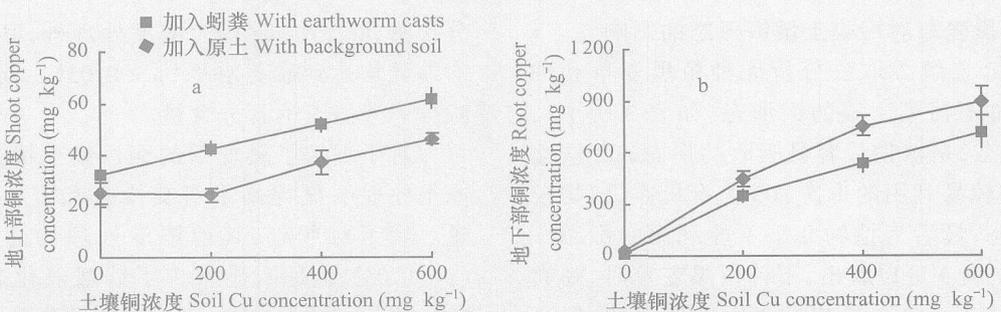


图4 蚓粪对黑麦草地上部(a)和地下部铜浓度(b)的影响

Fig 4 Effects of earthworm casts on Cu concentration in shoots (a) and roots (b)

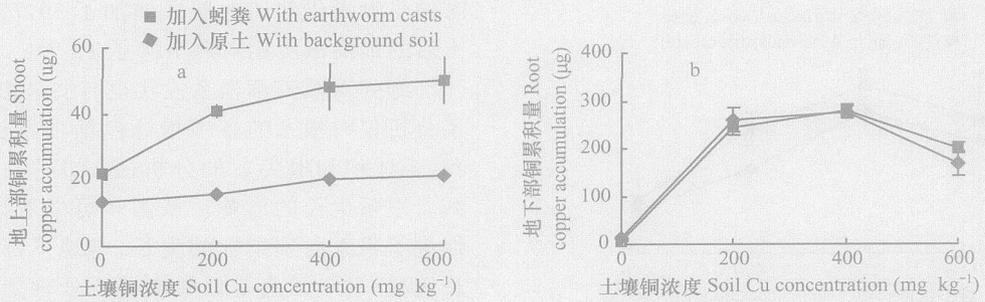


图 5 蚓粪对黑麦草地上部(a)和地下部铜累积量(b)的影响

Fig15 Effects of earthworm casts on Cu accumulation in shoots (a) and roots (b)

与地上部不同的是加蚓粪处理的黑麦草地下部铜浓度显著低于加原土处理(图 4b), 4 个浓度梯度的减少幅度分别为 5013%、2117%、2913%和 2018%, 都达到了极显著差异(p < 01001)。这表明添加蚓粪有利于根系中的 Cu 向地上部运移。尽管蚓粪处理的地下部铜浓度比原土处理的低, 由于生物量较大(图 2), 因此蚓粪处理和原土处理在各污染浓度时地下部的铜累积量差异不大(图 5b), 而且二处理地下部铜累积量都在 400 mg kg⁻¹时达到在大值后, 呈现下降趋势。

213 蚓粪和黑麦草对污染土壤 pH 的影响

如表 2 所示, 在无种植黑麦草的试验中, 蚓粪处

理的污染土的 pH 略高于原土处理的 pH, 但是二处理间没达到显著差异水平。而对于种植黑麦草的污染土壤, 蚓粪处理的 pH 略低于原土处理的 pH, 但同样没有达到显著水平。比较种植黑麦草与不种植黑麦草试验的土壤 pH 值, 发现种植黑麦草试验的土壤的 pH 明显低于没有种植试验的 pH。特别是蚓粪处理的土壤在种植黑麦草后, 其 pH 的下降幅度比原土的大。如在 200 mg kg⁻¹污染浓度下, 蚓粪处理的土壤的 pH 在种植黑麦草后下降了 0132, 达到极显著差异水平(p < 01001), 而原土处理的只下降了 0116, 为显著水平(p < 0105)。

表 2 蚓粪和黑麦草对土壤 pH 的影响¹⁾

Table 2 Effects of earthworm casts and ryegrass on soil pH

土壤铜浓度 Soil copper concentration (mg kg ⁻¹)	土壤 pH Soil pH			
	加入原土 With background soil		加入蚓粪 With earthworm casts	
	不种黑麦草 Without ryegrass	种黑麦草 With ryegrass	不种黑麦草 Without ryegrass	种黑麦草 With ryegrass
0	81 07? 01 07 ab	81 03? 01 13 ab	8111? 01 07 a	81 00? 01 05 c
200	81 00? 01 06 bc	71 84? 01 05 de	8105? 01 11 ab	71 73? 01 04 de
400	71 70? 01 05 efg	71 60? 01 03 ghi	7175? 01 06 de	71 57? 01 04 hi
600	71 63? 01 09 fghi	71 57? 01 02 hi	7167? 01 04 efgh	71 54? 01 03 i

1) 表中不同字母表示差异显著(p < 0105) Different letters in the table indicate significance in difference at p < 0105

214 蚓粪和黑麦草对污染土壤铜形态的影响

利用 BCR 连续提取法分析无种植黑麦草和种植黑麦草条件下污染土壤的铜形态(如表 3 所示), B1 为可交换态, 是植物最容易吸收的形态; B2 铁锰氧化态, 植物较易利用的形态; B3 为有机态, 植物较难利用的形态; 最后为植物几乎不能利用的形态) R 残渣态。从表 3 可以看出, 不种植黑麦草时, 蚓粪处理的可交换态百分含量略低于原土处理的, 但是没有达到显著水平。而铁锰氧化态和有机结合态则与可交换态相反, 蚓粪处理增加了这两种形态的百

分含量, 除了 0 mg kg⁻¹浓度处理外, 其它浓度处理的差异均达到显著水平(p < 0105)。同时蚓粪处理减少了残渣态的百分含量。

对于种植了黑麦草的铜污染土壤, 蚓粪处理比原土处理明显提高了可交换态和有机结合态的含量。除了对照外, 其他浓度处理均达到显著水平(p < 0105), 但是明显减少了铁锰氧化态的含量, 在 200、400 mg kg⁻¹浓度处理时达到显著水平(p < 0105)。至于残渣态, 与没种植黑麦草试验一样, 蚓粪处理的残渣态含量低于原土处理。

表 3 蚓粪和黑麦草对土壤铜形态的影响

Table 3 Effects of earthworm casts and ryegrass on fractions of soil Cu

铜浓度 Copper concentration (mg kg ⁻¹)	铜形态 Cu fraction								
	可交换态 Exchangeable Cu(%)		铁锰氧化态 Fe2Mn oxides2Cu(%)		有机结合态 OM2Cu(%)		残渣态 Residual Cu(%)		
	加入原土 With background soil	加入蚓粪 With earthworm casts	加入原土 With background soil	加入蚓粪 With earthworm casts	加入原土 With background soil	加入蚓粪 With earthworm casts	加入原土 With background soil	加入蚓粪 With earthworm casts	
0	NR	131.86? 0159g	131.54? 21.62g	101.73? 01.42gh	121.44? 21.33fg	321.501? 51.34a	291.60? 61.66ab	441.63? 41.86bc	421.75? 71.85c
	WR	151.19? 41.26fg	171.65? 31.37ef	101.60? 31.16h	91.36? 11.20f	271.58? 21.53b	281.25? 21.50b	481.97? 41.92a	471.30? 21.72ab
200	NR	191.95? 11.79e	181.37? 01.59e	271.30? 11.28b	301.82? 11.63a	221.43? 11.20c	301.78? 41.05ab	281.56? 31.52f	231.02? 21.55h
	WR	181.89? 11.09e	241.71? 11.69cd	241.64? 01.85c	211.67? 11.57e	221.22? 01.58de	281.14? 11.08b	331.53? 01.69de	251.47? 21.14fg
400	NR	261.49? 01.58cd	261.06? 01.61cd	241.29? 11.28cd	281.62? 11.02b	171.76? 21.75ef	221.01? 01.93cd	301.06? 11.74ef	231.31? 11.98gh
	WR	271.16? 51.96c	321.85? 11.41ab	251.14? 01.77c	221.50? 01.44de	141.63? 01.32g	191.14? 01.52de	271.59? 31.69fg	251.50? 11.43fg
600	NR	281.42? 11.05c	271.32? 01.85cd	221.70? 21.36de	251.45? 01.92c	121.93? 01.69gh	171.82? 11.60ef	341.85? 11.13d	291.41? 11.86ef
	WR	311.32? 11.21b	341.97? 11.10a	221.03? 01.32e	211.92? 01.28e	111.25? 01.18h	151.83? 01.58fg	351.39? 11.37d	271.28? 11.12fg

注: 在同一铜形态下不同字母表示差异显著($p < 0.05$) Different letters following figures in the same column indicate significance in difference at $p < 0.05$; NRI 不种植黑麦草 Without ryegrass; WRI 种植黑麦草 With ryegrass

比较不种植和种植黑麦草二试验的铜形态含量, 发现种植黑麦草后都提高了可交换态的含量。特别是蚓粪处理的增加量在各污染处理都达到显著水平($p < 0.05$), 而原土的增加量则没达到显著水平。另外, 黑麦草的种植减少了铁锰氧化态的含量, 而且蚓粪处理的减少量比原土处理的明显。同样, 黑麦草的种植也减少了有机态的含量, 但蚓粪处理与原土处理的差异不显著。而残渣态含量变化规律不明显并且没有显著差异。

3 讨论

铜是植物生长的必需微量元素, 本试验中污染土壤铜浓度在 200 mg kg^{-1} 时增加了黑麦草的生物量(图 1, 图 2), 说明土壤低浓度的铜污染能促进植物的生长, 这与储玲等的报道一致^[19]。但随着污染浓度的增加, 铜对黑麦草的生长产生抑制、甚至伤害, 这是因为受重金属元素影响植株根尖细胞有丝分裂数明显减少, 分裂速度减慢, 以致生物量减少缘故^[20]。黑麦草地下部干重在土壤铜浓度 200 mg kg^{-1} 达到最大后逐渐下降, 但土壤经蚓粪处理明显较原土处理的下降趋势缓慢(当土壤铜污染浓度为 400 mg kg^{-1} 时, 蚓粪处理和原土处理分别较各自对照下降了 61.0% 和 24.4%), 说明加入蚓粪能减缓铜污染对黑麦草的伤害, 但在最高污染浓度 600 mg

kg^{-1} 时, 降幅分别为 60.15% 和 61.18%, 说明减缓作用是有限的, 而且大部分铜累积在根部, 对地上部的毒害远少于地下部(图 1, 图 2), 这是因为铜在植物体内移动性较差的缘故。

从图 4a 和图 5a 即可以看出, 在 4 个浓度处理中, 蚓粪的加入都显著增加了黑麦草地上部的铜浓度, 加上生物量的增加, 最终促进了铜在加上部的累积量(图 4b)。对于地下部, 蚓粪的加入显著降低了根系的铜浓度(图 5b), 但由于生物量的影响, 蚓粪处理与加入原土处理的铜累积量差异不明显。从以上分析可以得出, 与原土处理相比, 蚓粪的加入不仅促进了黑麦草的生长, 更促进了重金属铜从地下部往地上部的运输, 使得地上部铜浓度增加, 最终导致黑麦草对重金属铜吸收的增加。

在不种植黑麦草的试验中, 发现蚓粪处理的重金属铜污染土壤的 pH 都比原土处理的 pH 略高, 尽管二处理间并没有达到显著差异水平。与此对应的是蚓粪处理的污染土的可交换态铜的百分含量略低于原土处理的, 但也没有达到显著差异水平。造成蚓粪处理的土壤 pH 较高的原因可能是蚓粪在一开始就含有略高的 pH(表 1)。蚓粪处理使土壤铜形态组成有较高的铁锰氧化态和有机结合态, 而原土处理含量最多的是残渣态, 表明蚓粪处理活化重金属的潜力比原土处理更大。

对于种植黑麦草试验, 蚓粪处理的土壤 pH 略

低于原土处理,但是没有达到显著差异水平,而蚓粪处理的土壤可交换态铜明显高于原土处理,铁锰氧化态的比例则显著低于原土处理,特别是污染浓度较低时。

通过对不种植黑麦草和种植黑麦草试验的土壤 pH 及铜形态含量的比较可知,种植黑麦草试验的污染土壤的 pH 明显低于不种植黑麦草试验,而且蚓粪处理的降幅更大。与此对应的是,种植黑麦草试验的污染土壤含有更高比例的可交换态铜和较低比例的铁锰氧化态和有机结合态铜。特别是蚓粪处理,在铜浓度 200 mg kg^{-1} 处理土壤,种植黑麦草试验中土壤可交换态铜的百分比例是不种植黑麦草试验的 1136 倍,而其铁锰氧化态和有机结合态铜则是不种植黑麦草试验的 0170 倍和 0191 倍,表明在种植植物条件下,蚓粪更能提高重金属铜的生物有效性,而且这种生物有效性的提高是通过形态的内部转化而来的。

根系在生长过程中,不仅从环境中摄取养分和水分,同时也向生长介质中分泌大量的有机物^[21]。这些根系分泌物中含有 H^+ 和大量的低分子量有机酸,如乳酸、醋酸、甲酸、苹果酸、草酸、丙酮酸等,它们增加了土壤中 H^+ 的浓度,酸化了根际土壤,导致了根际土壤 pH 值的降低^[22]。很多研究表明根际环境状况尤其是 pH 的改变直接影响重金属在土壤)植物系统中的迁移与转化^[1,2]。Mench 等发现燕麦根系分泌物通过溶解铁氧化物增加 Zn、Cd 等金属的生物有效性^[23],也有研究者模拟根系分泌物研究其对重金属的活化作用,发现有机酸和氨基酸对土壤中重金属 Pb、Zn、Cd、Cu 具有较强的活化效应^[24],陶澍等研究发现玉米,大豆和小麦根际环境中的交换态铜均显著超过非根际的,推测可能与根际环境 pH 值的改变有关^[25]。由于土壤中的重金属绝大多数都以难溶态存在, pH 的改变会使土壤中金属的存在形态发生变化,从而改变其活性和生物有效性,并进一步影响其在土壤)植物系统中的迁移转化状况。图 3 表明,蚓粪处理极显著地促进了根系的生长,很多报道也表明蚓粪对根系的生长有着显著的促进作用^[7,26]。蚓粪在促进黑麦草根系生长的同时,黑麦草根系向土壤分泌的物质即根系分泌物也会随之增加;在本试验中发现种植黑麦草后的污染土壤的 pH 较没种植的要低,特别是添加蚓粪后 pH 降低更明显,这也是加入蚓粪后植物生长旺盛、酸性根系分泌物增多的佐证(表 2)。

根据以上分析,推测蚓粪促进黑麦草对铜的吸收

可能并不是蚓粪直接活化重金属,而是通过促进植物根系生长和活动(根系分泌物旺盛)影响根系周围环境(改变根系周围环境的 pH、增加根际有机酸)来提高重金属铜的生物有效性进而达到增加铜的吸收。

另外,蚓粪除了间接活化重金属的生物有效性外,还促进了铜从地下部往地上部的运输(图 4),其原因可能是:(1)蚓粪中含有丰富的有机物与微生物,在微生物分解有机质的过程中,产生的天然络合物能将重金属络合成可溶的有效态^[27]。(2)蚓粪可能含有某些活性物质如柠檬酸、苹果酸等,已有文献报道,一些低分子有机酸可能作为重金属吸收的配基,促进根系对重金属的吸收与积累^[28]。但是蚓粪中含有多少这类活性物质及如何作用于重金属则需要进一步研究。(3)蚓粪中含有丰富的氮素和其他营养物质,由于氨基酸、蛋白质中的氮原子对铜的亲合力影响铜在植株体内的移动,所以氮肥用量增加时,作物需铜量也要增加^[23],因此蚓粪促进了植物生长的同时也促进了铜从根系往地上部的输送。

4 结 论

在铜污染土壤)黑麦草系统中,蚓粪有以下作用:

- 1) 提高了黑麦草的生物量,显著地促进了黑麦草根系的生长。
- 2) 增加了黑麦草地上部的铜浓度和铜累积量,但减少了地下部的铜浓度,促进了铜从地下部往地上部的运输。
- 3) 通过促进黑麦草根系的生长和活动(根系分泌物旺盛)而影响根系周围环境,提高重金属铜的生物有效性进而增加植物对铜的吸收。

参 考 文 献

- [1] 刘文菊,张西科,张福锁. 根分泌物对根际难溶性镉的活化作用及对水稻吸收、运输镉的影响. 生态学报, 2000, 20(3): 448-451. Liu W J, Zhang X K, Zhang F S. The mobilization of root exudates on Cd in rice rhizosphere and their effect on Cd uptake and transport (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3): 448-451
- [2] Shan X Q, Lian J, Wen B, et al. Effect of organic acids on adsorption and desorption of rare earth elements. Chemosphere, 2002, 47: 701-710
- [3] Pablo R, Hidalgo P, Richard L, et al. Earthworm castings as a substrate amendment for Chrysanthemum production. Hort Science, 2002, 37(7): 337-344
- [4] Simeon A M. Nutrient availability and maize growth in a soil amended with earthworm casts from a South African indigenous species.

- Bioresource Technology, 2002, 84: 197~ 201
- [5] 胡艳霞, 孙振钧, 程文玲. 蚯蚓养殖及蚓粪对植物土传病害抑制作用的研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(2): 296~ 300. Hu Y X, Sun Z J, Cheng W L. Advances in vermiculture and inhibition of vermicompost to soil borne disease (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 296~ 300
- [6] Hala I C, Larry M Z, Tsutomu O. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 295~ 302
- [7] 胡佩, 刘德辉, 胡锋, 等. 蚓粪中的植物激素及其对绿豆插条不定根发生的促进作用. 生态学报, 2002, 22(8): 1 211~ 1 214. Hu P, Liu D H, Hu F, et al. Plant hormones in earthworm casts and their promotion on adventitious root formation of mung bean cutting (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1 211~ 1 214
- [8] Pallant E, Hilster L M. Earthworm response to 10 weeks of incubation in a pot with acid mine spoil, sewage sludge, and lime. Biol. Fertil. Soils, 1996, 22: 355~ 358
- [9] Geste C A, Mvan G, Disson W A. The influence of soil characteristics on the toxicity of four chemicals to earthworm *Eisenia fetida* and *Oligochaeta*. Biol. Fertil. Soils, 1988, 6: 262~ 265
- [10] Ma Y, Mdickinson N, 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
- [11] Wen B, Hu X Y, Liu Y, et al. The role of earthworms (*Eisenia fetida*) in influencing bioavailability of heavy metals in soils. Biology and Fertility of Soils, 2004, 40(3): 181~ 187
- [12] 俞协志, 陈杰民. 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. Yu X Z, Chen J M. Effect of earthworm on bioavailability of Cu and Cd in soils (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 922~ 928
- [13] 贾秀英, 罗安程, 李喜梅. 高铜、高锌猪粪对蚯蚓的急性毒性效应研究. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1 527~ 1 530. Jia X Y, Luo A C, Li X M. Acute toxicological effects of excessive Cu and Zn containing in pig manure on earthworm (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1 527~ 1 530
- [14] 王振中, 郭永灿, 邓继福, 等. 土壤重金属污染对蚯蚓 (*Opisthopora*) 影响的研究. 环境科学学报, 1994, 14(2): 236~ 243. Wang Z Z, Guo Y C, Deng J F, et al. Effect of heavy metals in soil on earthworms (*Opisthopora*) (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 1994, 14(2): 236~ 243
- [15] 李惠英, 陈素英, 王豁. 铜、锌对土壤植物系统的生态效应及临界含量. 农村生态环境, 1994, 10(2): 22~ 24. Li H Y, Chen S Y, Wang H. Study on the effects of Cu and Zn in soil plant system as well as their critical contents (In Chinese). Rural Ecological Environment, 1994, 10(2): 22~ 24
- [16] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Lu R K. ed. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [17] Ure A M, Quevauviller P H, Muntau H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of European Communities. Int. J. Environ. Anal. Chem., 1993, 51: 135~ 151
- [18] Rauret G L, Sanchez J F, Sahuquillo A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. J. Environ. Monit., 1999, 1: 57~ 61
- [19] 储玲, 刘登义, 王友保, 等. 铜污染对三叶草幼苗生长及活性氧代谢影响的研究. 应用生态学报, 2004, 15(1): 119~ 122. Chu L, Liu D Y, Wang Y B, et al. Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of *Trifolium pratense* (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 119~ 122
- [20] 陈桂珠. 重金属对黄瓜种子萌发生长的影响研究. 植物学通报, 1990, 7(1): 240~ 243. Chen G Z. Study on the effect of heavy metals on the growth of cucumber seedling (In Chinese). Chinese Bulletin of Botany, 1990, 7(1): 240~ 243
- [21] 王俊儒, 安保珠, 尉庆丰. 油菜、荞麦根分泌物中糖及有机酸组分的研究. 西北农业大学学报, 1995, 23(6): 42~ 46. Wang J R, An B Z, Wei Q F. Determination of carbohydrates and organic acids in the root exudates of rape and buckwheat (In Chinese). Acta Univ. Agric. Borealioccidentalis, 1995, 23(6): 42~ 46
- [22] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 等. 根系分泌物生态学研究. 生态学杂志, 2002, 21(6): 57~ 62. Chen L C, Liao L P, Wang S L, et al. A review of research of root exudates ecology (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(6): 57~ 62
- [23] Mench M, Mart in E. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L., *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L. Plant and Soils, 1991, 132: 187~ 196
- [24] 杨仁斌, 曾清如, 周细红, 等. 植物根系分泌物对铅锌尾矿污染土壤中重金属的活化效应. 农业环境保护, 2000, 19(3): 152~ 155. Yang R B, Zeng Q R, Zhou X H, et al. The activated impact of plant root exudates on heavy metal s in soils contaminated by tailing of LeadZinc Ore (In Chinese). Agricultural Environmental Protection, 2000, 19(3): 152~ 155
- [25] 陶澍, 邓宝山, 张学青, 等. 不同作物根际环境对土壤重金属形态的影响. 土壤学报, 2001, 38(1): 54~ 59. Tao S, Deng B S, Zhang X Q, et al. Effect of root system on metal fractionation in rhizosphere of contaminated soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 54~ 59
- [26] Luciano P C, Fabio L O, Anna L O F. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺ ATPase activity in maize roots. Plant Physiology, 2002, 130(4): 1 951~ 1 957
- [27] 鲁如坤. 土壤植物营养原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998. Lu R K. The Nutrient and Fertilizing Theory of Soilplant (In Chinese). Beijing: Chemical and Industrial Press, 1998
- [28] 龙新宪, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 外源有机酸对两种生态型东南景天吸收和积累锌的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 467~ 472. Long X X, Ni W Z, Ye Z Q, et al. Effect of organic acids application on zinc uptake and accumulation by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 467~ 472

EFFECT OF EARTHWORM CASTS ON COPPER UPTAKE BY RYEGRASS IN COPPER POLLUTED SOIL

Lin Shufen Li Huixin Hu Feng

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

Abstract A pot experiment was conducted to examine effects of earthworm (*Pheretima* sp.) casts on copper uptake by ryegrass (*Lolium multiflorum*). The experiment had three levels (200, 400 and 600 Cu mg kg⁻¹) of Cu contamination of the soil (Orthic aquisol) prepared by adding CuSO₄·5H₂O, two treatments of soil amendments, earthworm casts (15%) and background soil (15%) and two treatments of plantation, with ryegrass and without ryegrass. Results show that earthworm casts significantly increased biomass of shoots and roots ($p < 0.001$), and length, surface area, volume and number of tips of the root system, and the effect was the highest when Cu content of the soil was 200 mg kg⁻¹. It also increased copper concentration and accumulation in shoots ($p < 0.05$), but decreased copper concentration in roots. That means earthworm casts can promote copper transportation from roots to shoots and copper accumulation in shoots. In addition, analysis of soil pH and Cu fractions (BCR sequential extraction) show that plantation of ryegrass decreased soil pH and increased content of exchangeable Cu, and these effects could be strengthened by addition of earthworm casts. It could be inferred that earthworm casts promote copper uptake of ryegrass mainly by stimulating growth and activity of the roots, which in turn affects the rhizosphere environment and enhances bioavailability of copper.

Key words Earthworm cast; Heavy metal copper; Ryegrass; Root; pH; BCR sequential extraction