

文章编号: 1674-7054(2019)02-0151-08

蚯蚓处理对猪粪重金属富集的影响

黄 炜^{1,2}, 刁晓平^{2,3}, 李森楠^{1,2}, 龚 莹^{1,2}

(1. 海南大学 热带农林学院, 海口 570228; 2. 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570228;
3. 海南师范大学, 海口 571158)

摘 要: 以干湿分离后的猪粪为基质, 接种赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*) 在室内培养4周后, 利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定猪粪和蚯蚓体内的重金属(Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, As)的含量, 系统研究了蚯蚓作用下猪粪中重金属形态变化及蚯蚓体内重金属的富集特征。结果表明: 供试猪粪能促进蚯蚓的生长, 4周后体质量明显增加, 且对蚯蚓的繁殖没有影响。蚯蚓处理4周后, 猪粪pH值由6.51增加至6.86。猪粪中Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, As的总量与对照组相比, 分别降低了13.69%、24.47%、30.70%、39.17%、21.91%、9.36%; 同时, 猪粪中Zn, Cr, Cd的残渣态比例相比对照组分别减少了15%、27%、27%。蚯蚓对重金属有一定富集作用, 除Cr以外, Cu, Zn, Cd, As 4种重金属在蚯蚓体内的质量含量相比实验前分别增加了0.49、3.86、0.012、0.064 mg·kg⁻¹, 并表现出一定的时效关系, 其富集系数大小顺序为Cr > Cd > Zn > Cu > As。研究表明, 蚯蚓能富集猪粪中的重金属并且降低猪粪中的重金属含量, 同时减少了猪粪中的部分重金属残渣态比例, 有利于重金属的转移和去除。

关键词: 蚯蚓; 猪粪; 重金属; 富集特征

中图分类号: X 713; Q 959.9

文献标志码: A

DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2019.02.009

20世纪以来, 集约化和规模化的养猪场为了加快猪的生长速度、提高养殖效率及降低生产成本而在饲料中添加重金属元素的情况已十分常见。部分养猪场使用的配合饲料中重金属添加剂的含量甚至超过国家标准的几十倍, 远远超过猪生长所需重金属元素的含量^[1-2], 直接造成了猪粪中重金属含量超标。而猪粪等有机废弃物因价格低廉、获取便利被大量应用于生物有机肥的生产中, 致使猪粪中残留的重金属元素向水土环境中转移并累积, 成为环境重金属污染的重要来源之一^[3-6]。针对这一污染问题, 有人利用蚯蚓(*Eisenia fetida*, *Bimastus parvus*)对猪粪进行无害化处理, 结果表明, 蚯蚓对猪粪中Cu, Zn, Pb, Hg等重金属元素均存在一定的富集作用^[7-8]。同时, 为提高养猪场中粪尿的处理效率, 减小环境生态压力, 近年来集约化养猪场逐渐开始通过使用固液分离机设备对猪粪尿进行干湿分离等处理, 以减少污染排放。已有研究表明, 蚯蚓对经水泡、干湿分离后猪粪的处理效果优于对发酵鸡粪、牛粪及城市污泥的处理效果^[9]。重金属的存在形态对环境及生物的影响同样十分重要, 近年来, 许多学者利用BCR (European Community Bureau of Reference, 欧共体标准司)连续提取法^[10]分析土壤、城市污泥及畜禽粪便中的重金属形态分布特征^[11-12], 将重金属分为可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态。其中, 可交换态为酸可溶态, 极易溶于弱酸、容易释放在水中, 且容易在环境中迁移转化或被植物吸收, 是重金属污染的主要形态; 可还原态是与Fe, Mn氧化物结合在一起, 以细小的分散颗粒存在的形态; 可氧化态是各种有机物的活性基团与金属配位体结和的形态; 残渣态则一般存在于硅酸盐、矿物的晶格中, 性质稳定, 一般条件下极难释放^[13], 但蚯蚓对干湿分离后猪粪中残留重金属元素的形态是否存在影响鲜有报道。赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)因其繁殖率高、适

收稿日期: 2019-01-09

修回日期: 2019-03-03

基金项目: 蚯蚓处理热带农业废弃物综合利用技术与示范推广项目(HDNY 201702); 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2017002); 农业技术创新与推广(R100254.301)

作者简介: 黄炜(1993-), 男, 海南大学热带农林学院2016级硕士研究生, E-mail: 919501828@qq.com

通信作者: 刁晓平(1963-), 女, 博士, 教授, 博导, 研究方向: 污染毒理学, E-mail: diaoxip@hainu.edu.cn

应性强、食性广而被广泛应用于城市污泥、畜禽废弃物的处理^[14-16]。笔者以赤子爱胜蚓处理干湿分离后的猪粪,利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定猪粪和蚯蚓体内的Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As的含量,研究蚯蚓作用下猪粪中重金属形态变化及蚯蚓体内重金属的富集特征以及赤子爱胜蚓在干湿分离后猪粪中的生长情况,旨在为利用蚯蚓减少当前养猪业重金属污染及其在生态循环农业中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料 供试猪粪为海南罗牛山10万头现代化猪场产生的经固液分离设备干湿分离后的干猪粪,其基本理化指标见表1。供试蚯蚓为海南大学农科基地的成熟的赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),实验前先用人工土对蚯蚓进行预培养并清肠,选择个体大小相近的蚯蚓进行实验。

表1 原始猪粪的基本理化指标

Tab. 1 Basic physical and chemical indexes of raw pig manure

指标 Index	pH	有机碳/% Organic carbon	全氮/% Total N	全磷/% Total P	全钾/% Total K	
数值 Value	6.51 ± 0.050	49.85 ± 6.33	1.59 ± 0.012	2.94 ± 0.36	0.73 ± 0.021	
指标 Index	Cu/(mg · kg ⁻¹)	Zn/(mg · kg ⁻¹)	Cr/(mg · kg ⁻¹)	Pb/(mg · kg ⁻¹)	Cd/(mg · kg ⁻¹)	As/(mg · kg ⁻¹)
数值 Value	62.829 4	435.596 0	17.978 7	4.392 4	0.137 4	0.735 5

1.2 实验设计 本实验以40 cm × 40 cm × 30 cm塑料整理箱为容器,将清肠后的50 g蚯蚓置入3 kg干猪粪中为实验组,不放蚯蚓的干猪粪为空白对照组,重复3次。为保持各组中猪粪的含水率一致,实验过程中每隔2天通过称重法添加纯水。实验期间,分别于第0、1、2、3、4周收集实验组猪粪和蚯蚓及对照组猪粪。

1.3 仪器设备 电子天平(METTLER TOLEDO ME104E); pH计(METTLER TOLEDO FiveEasy Plus FE28); 微波消解仪(MILESTONE ETHOS ONE); 电感耦合等离子体质谱仪(Agilent Technologies 7700 Series ICP-MS)。

1.4 测定方法 蚯蚓平均体质量:每一实验组收集50条蚯蚓,清肠后用纯水清洗,用滤纸吸去多余水分,然后称重。猪粪pH值:按照中国农业行业标准NY/T 1377—2007^[17]进行测定。重金属的测定:收集每组蚯蚓和猪粪并冻干,研磨后过100目网筛。猪粪重金属各形态的测定处理参考改进的BCR连续提取法^[18],用0.11 mol · L⁻¹乙酸提取可交换态,0.5 mol · L⁻¹盐酸羟胺提取可还原态,体积分数为30%的双氧水提取可氧化态,硝酸、氢氟酸、高氯酸混合消解提取残渣态。蚯蚓体内重金属含量的测定按照中国国家标准GB 5009系列中重金属元素微波消解方法进行处理^[19-21],处理后的样品使用ICP-MS进行测定。

1.5 数据统计 所有数据通过Excel 2016汇总计算,处理后的数据使用Origin 2018制图,用IBM SPSS Statistics 24软件进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓处理后猪粪pH值的变化 pH值是影响金属元素形态变化的主要因素之一,从表2可知,随实验时间的增加,实验组和对照组猪粪pH值均有所上升。1周后,实验组猪粪的pH值均高于对照组,实验4周后,实验组的pH值由实验前的6.51 ± 0.05增至6.86 ± 0.08,说明蚯蚓处理能增加酸性猪粪的pH值,降低猪粪的酸化水平。

表2 蚯蚓处理前后猪粪pH值的变化

Tab. 2 The pH value of pig manure after earthworm exposure

pH值 pH value	第0周 Week 0	第1周 Week 1	第2周 Week 2	第3周 Week 3	第4周 Week 4
对照组 Control group	6.51 ± 0.05	6.55 ± 0.10	6.64 ± 0.10	6.68 ± 0.04	6.76 ± 0.10
实验组 Experimental group	6.51 ± 0.05	6.65 ± 0.06	6.69 ± 0.10	6.73 ± 0.08	6.86 ± 0.08

2.2 蚯蚓处理后猪粪中重金属含量变化 如图1所示,蚯蚓处理后,实验组猪粪中6种重金属总量与对照组相比均有不同程度的下降,且下降速率存在差异。4周后,实验组猪粪中Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As的总量分别下降至56.19、304.10、12.05、2.52、0.097、0.70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比对照组分别下降了13.69%、24.47%、30.70%、39.17%、21.91%、9.36%, 其中,Pb的减少比例最大(39.17%),As的减少比例最小(9.36%)。但试验的第2周与第4周相比,实验组及对照组中6种重金属的总量均无明显变化,结果表明,本实验条件下,蚯蚓对猪粪中重金属总量的影响在第2周后并没有明显的时效关系。

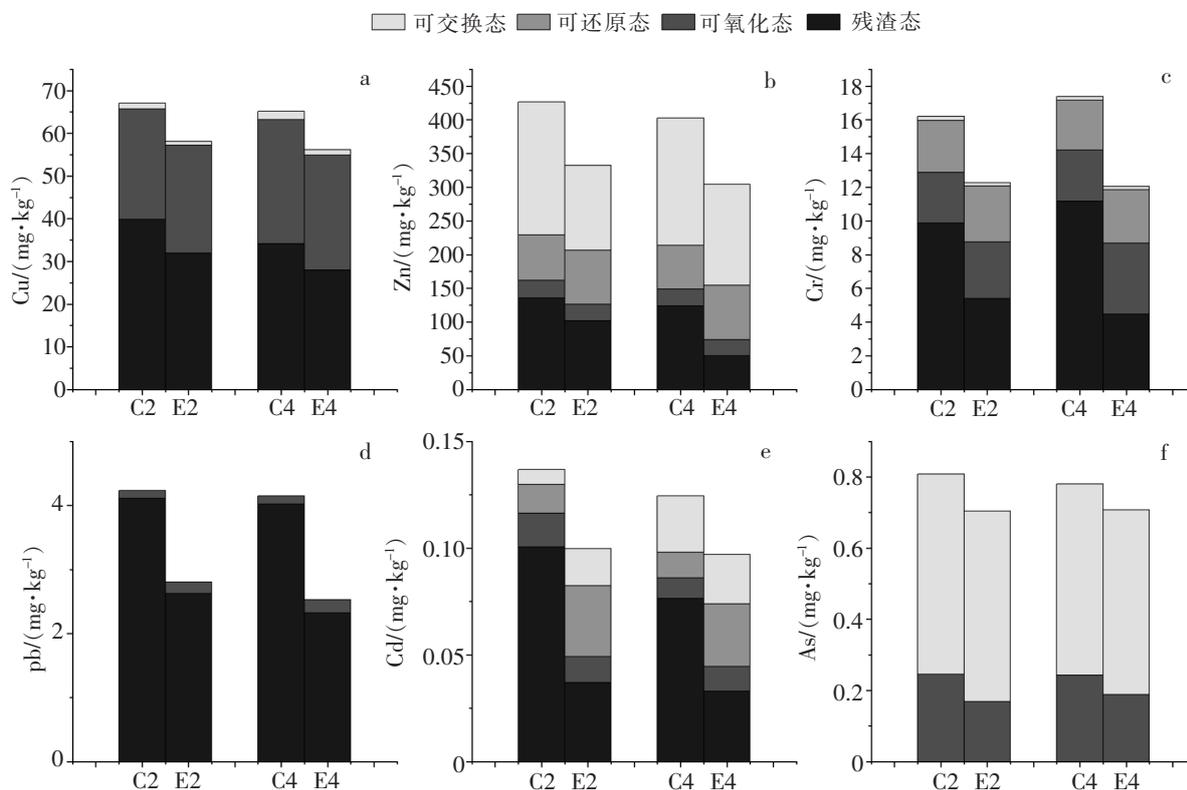


图1 不同时段各组猪粪中不同形态重金属的总量

C:对照组; E:实验组。2:第2周; 4:第4周

Fig.1 The total amount of different heavy metals in each group of pig manure at different time

C: Control group; E: Experimental group. 2: Week 2; 4: Week 4

2.3 蚯蚓处理对猪粪重金属形态的影响 从图2可知,原始猪粪中Zn、Cr、Cd均含有一定比例的可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态,Cu含有可交换态、可氧化态和残渣态,Pb仅有可氧化态和残渣态,As仅有可交换态和可氧化态。蚯蚓处理猪粪4周后,与对照组相比,实验组猪粪中Zn、Cr和Cd的残渣态比例均有下降,分别下降了15%、27%和27%,Zn、Cr和Cd可氧化态比例均有所上升,分别上升了2%、18%和4%,可还原态比例也明显增加,分别上升了12%、9%、20%,Cd的可还原态比例增幅最大,由10%增至30%,增加了2倍。而猪粪中Cu、Pb、As 4种形态比例无明显变化,其变化幅度均未超过5%。结果表明,蚯蚓对猪粪中Zn、Cr、Cd有不同程度的活化作用,但对Cu、Pb、As的活化作用不明显。

2.4 蚯蚓在猪粪中的生长情况 蚯蚓在猪粪中4周的生长情况如图3所示,第1周蚯蚓体质量极显著上升($P < 0.01$)至 (0.48 ± 0.03) g,然后在2周的时间内维持在一定的水平,到第3周蚯蚓平均体质量达到了峰值 $[(0.50 \pm 0.02)$ g],增幅约73%。第3周后平均蚯蚓体质量开始下降,到第4周试验结束,平均体质量为 (0.41 ± 0.01) g。这可能是蚯蚓繁殖后体质量下降造成的,或可能与猪粪中有机质等营养物质被消耗,无法为生物量增多后的蚯蚓提供充足的食物有关。同时,实验组在第1周后可观察到少量蚓茧,第2~3周可观察到大量蚓茧,第4周后可观察到有少量细小的幼蚓存在。

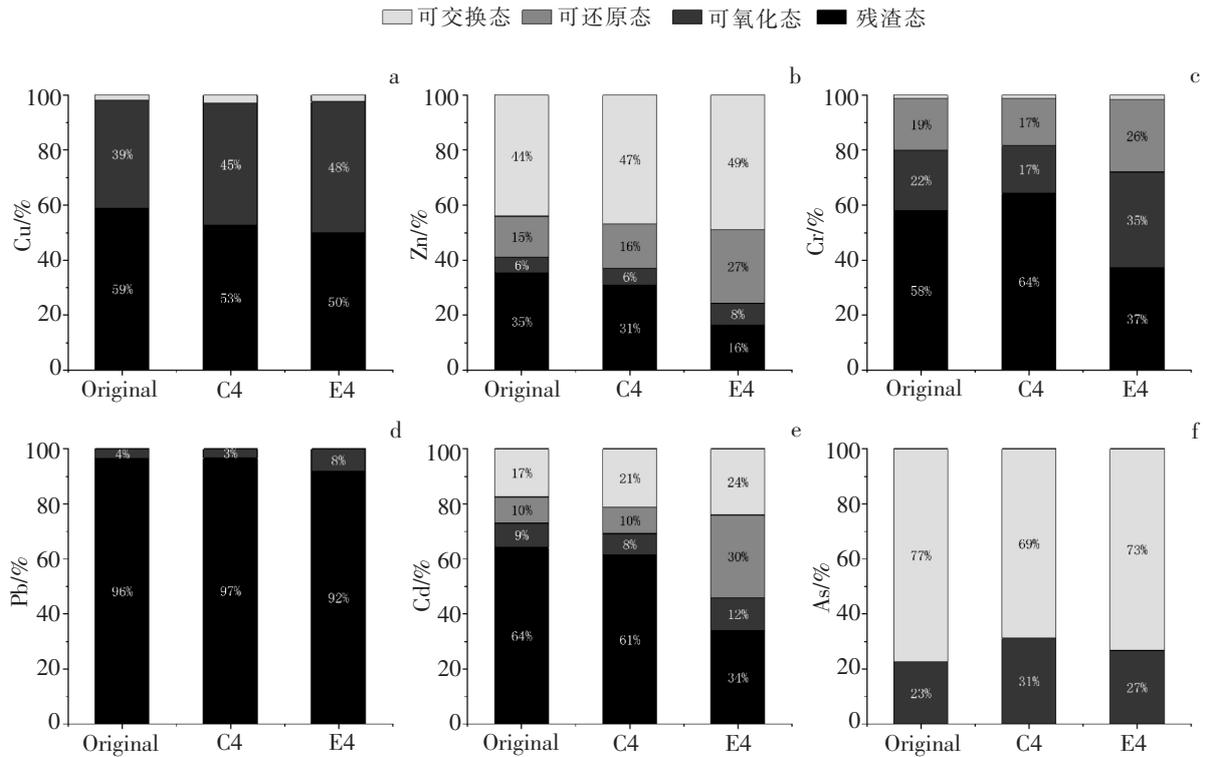


图 2 不同处理下猪粪中不同形态重金属的比例

C: 对照组; E: 实验组; 4: 第 4 周

Fig.2 The proportion of different heavy metals in pig manure under different treatments

C: Control group; E: Experimental group; 4: Week 4

2.5 蚯蚓对猪粪中重金属的富集 如图 4 所示,蚯蚓体内 Cu, Zn, Cd, As 的含量在实验结束后均有增加,但其变化趋势存在差异。Cu, Cd, As 3 种元素的含量与实验时间呈正相关关系,第 4 周时富集量分别为 0.490, 0.012, 0.064 mg · kg⁻¹。而蚯蚓对 Zn 的富集主要集中在第 1 周内,蚯蚓体内的 Zn 含量由实验前的 46.07 mg · kg⁻¹ 上升至第 1 周时的 49.74 mg · kg⁻¹,之后则无明显上升;蚯蚓体内 Cr 含量无明显变化,实验前后分别为 5.67 mg · kg⁻¹ 及 5.63 mg · kg⁻¹;而 Pb 的含量因在第 1 周时已低于检出限,故无法检测。

富集系数公式 (BSAF) (富集系数 = 蚯蚓体内重金属浓度 / 猪粪中重金属浓度)^[22] 计算结果表明:随着蚯蚓处理时间的延长,5 种重金属的富集系数明显增加,表现出一定的时效关系。从表 3 可知,随实验时间的增长,蚯蚓对 Cu, Zn, Cr, Cd, As 的富集系数也逐渐增大,分别由第 1 周时的 0.135, 0.122, 8.381, 5.104, 2.095 增加至第 4 周的 0.145, 9.164, 2.046, 7.191, 2.145。在实验时间内,蚯蚓对 Cu, Zn, Cr, Cd, As 的富集系数与时间呈正相关。第 4 周时 5 种重金属富集系数大小顺序为 Cr > Cd > Zn > Cu > As,而且相比第 1 周, Cu, Zn, Cr, Cd, As 的富集系数分别增加了 8.09%, 33.69%, 22.46%, 83.46%, 51.98%。说明在实验过程中,蚯蚓对不同重金属的富集速率不同。

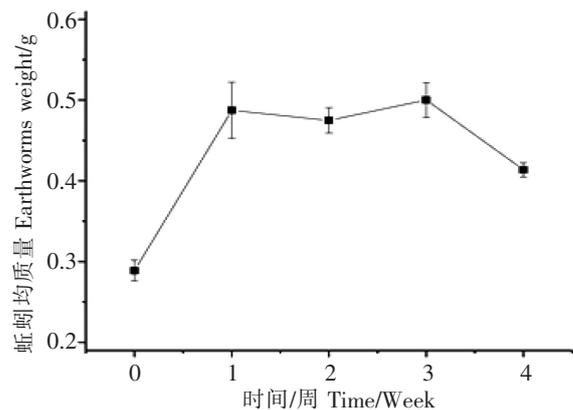


图 3 蚯蚓平均体质量的变化趋势

Fig.3 The change of average weight of earthworms

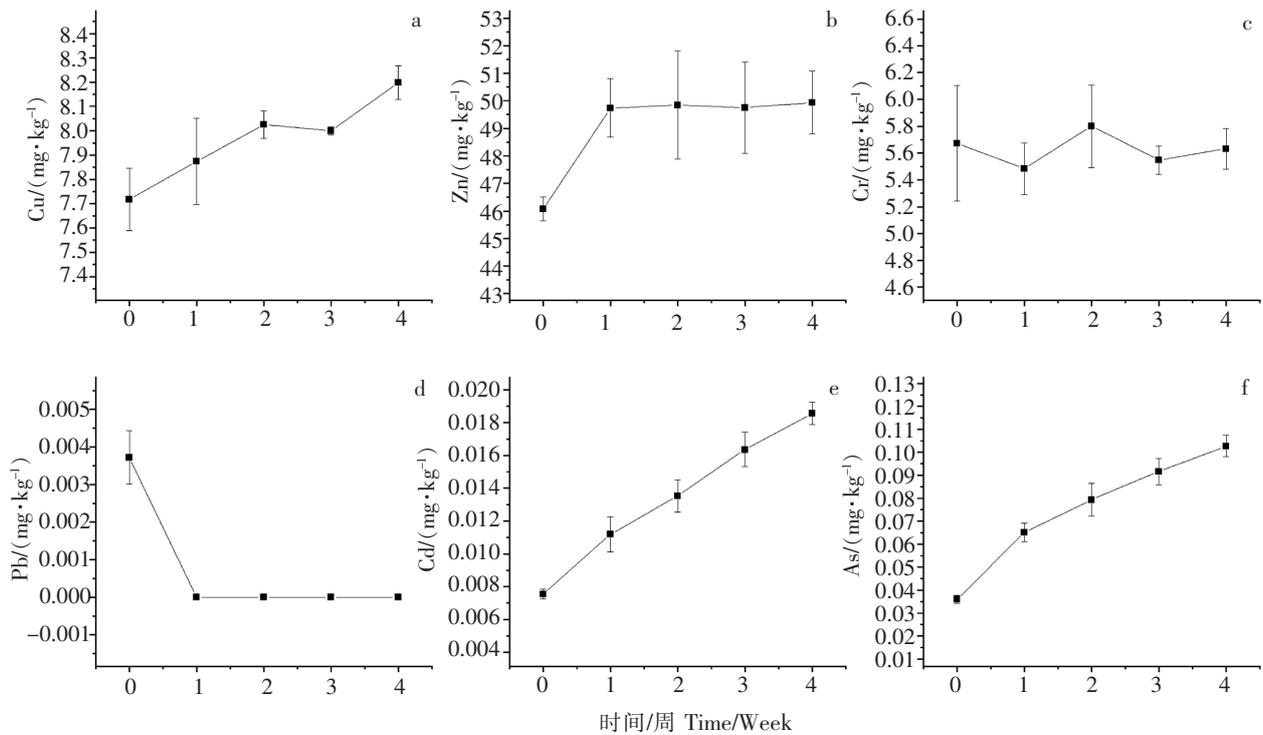


图 4 不同处理时间下蚯蚓体内重金属含量的变化

Fig.4 The change of heavy metal content of earthworms under different treatment time

表 3 不同时段蚯蚓对猪粪中重金属的富集系数

Tab.3 BSAF for heavy metals in the earthworms from the pig manure at different time

富集系数 BSAF	Cu	Zn	Cr	Cd	As
第 1 周 Week 1	0.14	0.12	0.38	0.10	0.10
第 2 周 Week 2	0.14	0.15	0.47	0.14	0.11
第 3 周 Week 3	0.14	0.16	0.48	0.17	0.13
第 4 周 Week4	0.15	0.16	0.47	0.19	0.15

3 讨 论

本研究中,蚯蚓处理促进了弱酸性猪粪中 pH 值的增加。周吉奎、刘亚纳等的研究表明,赤子爱胜蚓能够使碱性或酸性物料的 pH 值向中性变化^[12,23],这与本研究结果一致。pH 值是影响重金属状态的重要因素之一,重金属在酸性条件下更容易被活化^[12]。本实验中,蚯蚓处理增加了猪粪的 pH 值,但同时促进了重金属的活化,这既可能与蚯蚓处理过程中复杂的微生物及酶等作用有关,也可能与供试猪粪和其他实验所用物料间存在的差异有关。

蚯蚓对物料中重金属状态的影响在不同研究中的结果并不一致^[24-26]。本研究中,蚯蚓能够活化猪粪中的重金属,提高猪粪中重金属的生物可利用性。在蚯蚓处理下,猪粪中 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As 不同金属形态的总量均有不同程度的减少,并且蚯蚓处理显著减少了 Zn、Cr、Cd 的残渣态比例,在减少猪粪重金属总量的同时对重金属有一定的活化作用。供试猪粪中 Cu、Pb、As 的状态无明显变化,可能是由于供试猪粪本身所含重金属含量低于普通猪粪,且金属的残渣态和可氧化态状态较稳定,因此,蚯蚓处理未对猪粪中 Cu、Pb、As 的状态造成明显影响。

实验过程中,赤子爱胜蚓在猪粪中的体质量最大增幅达到了 73%,第 1 周后的蚯蚓平均体质量显著

高于初始体质量。这可能是由于供试猪粪的有机质等营养物质含量高,且经干湿分离后重金属等有害物质减少,更有利于蚯蚓生长的缘故。同时,在实验过程中,能够观察到产生的蚓茧及幼蚓,证明赤子爱胜蚓在经干湿分离的猪粪中不仅生长良好而且还能进行繁殖。而第3周后蚯蚓平均体质量下降可能是蚯蚓繁殖后体质量下降造成的,也可能与猪粪中有机质等营养物质被消耗,无法为生物量增多后的蚯蚓提供充足的食物有关。

由于动物样品自身结构成分多样,动物体内化学反应过程复杂且机理尚未明确,动物体内重金属的存在形态在当前的生物地球化学研究中也暂不作为研究参考^[27]。因此,本研究未对蚯蚓体内的各种重金属形态的变化做检测。不同实验中蚯蚓对重金属的富集能力差异较大,吴国英等的研究表明,蚯蚓对猪粪中Cu和Zn的富集系数为0.43和0.73^[28];张泳楨利用蚯蚓处理猪粪的试验结果显示,蚯蚓对Cu、Zn、Cd、As的富集系数分别为0.35、0.27、13.07、13.56^[29]。本研究中,蚯蚓在猪粪中生长的同时显著富集了Cu、Zn、Cd、As元素,但富集量及富集系数明显低于前人的结果。同时,有研究表明,在重金属元素浓度超标的土壤中,蚯蚓对重金属吸收顺序为Cd > Hg > As > Zn > Cu > Pb^[30],这与本实验的结果不完全一致。这些差异可能是由于不同物料中重金属含量及形态差异较大造成的,并且在污染程度较低的物料中蚯蚓对重金属的富集能力较低^[31],而供试猪粪经干湿分离后,猪粪中大量的可交换态重金属随液体被分离,因此,供试猪粪本身的重金属总量及生物可直接利用的重金属远低于普通猪粪,尤其是供试猪粪中Pb总量较低且绝大部分以生物体难以直接利用的残渣态的形式存在,故蚯蚓无法富集供试猪粪中的Pb,因此,在第1周后均未检出Pb。这些因素导致了本实验中蚯蚓虽然对猪粪中重金属存在富集作用,但富集效果与其他使用普通猪粪的研究相比差异较大。

大量研究表明,畜禽粪便等有机废弃物经蚯蚓处理后形成的蚯蚓粪再经过加工,被作为有机肥料施用于农田能够有效提高土壤肥力、显著增加各种农作物的产量、提高部分农作物的品质及改良贫瘠土壤性质^[32-36]。同时有研究表明,生物有机肥中残留的重金属元素增加了土壤中重金属的含量^[37]。本研究供试猪粪中重金属元素经蚯蚓处理后有不同程度的活化,在物理化学或生物等处理措施下活化后的重金属更容易被转移和去除^[38-39]。同时,蚯蚓本身及其加工后的产品也是重要的农业资源。蚯蚓及其产品含有丰富的蛋白质、维生素及抗菌肽等活性物质,在动物饲料中添加蚯蚓粉等物质能够显著提高各种畜禽及水产动物的生产繁殖性能、提高免疫力和增加养殖经济效益^[40-42]。而使用含不同浓度重金属的蚯蚓液饲喂番鸭后,番鸭体内的重金属含量远低于国家限量且与蚯蚓液的浓度及添加量无相关性^[43]。用于处理猪粪的蚯蚓还可以制成各类蚯蚓产品,以提高经济效益,促进农业可持续循环发展。由此可见,在减少生物有机肥中重金属元素对环境污染的要求下,蚯蚓处理畜禽粪便是一种有效可行的措施。

蚯蚓在干湿分离后的猪粪中能够很好生长并进行繁殖。蚯蚓处理后能增加猪粪的pH值,并减少猪粪中Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As的含量,且降低了Zn、Cr、Cd的残渣态比例,有利于重金属的转移和去除。蚯蚓能够富集猪粪中的重金属,除重金属Cr外,蚯蚓体内Cu、Zn、Cd、As的含量随处理时间延长明显增加,由于猪粪中Pb的含量较低,在蚯蚓体内未检出。蚯蚓对Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As的富集系数大小顺序为Cr > Cd > Zn > Cu > As。本研究结果表明,蚯蚓能通过自身的富集减少猪粪中所测重金属含量,改变重金属的形态,有利于猪粪中重金属的转移和去除,这为畜禽废弃物在生态循环农业中的安全应用提供了重要依据。

参考文献:

- [1] 潘寻,韩哲,贲伟伟. 山东省规模化猪场猪粪及配合饲料中重金属含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 160-165.
- [2] 吴大伟,李亚学,吴萍,等. 规模化猪场育肥猪饲料、猪肉及粪便中重金属含量调查[J]. 畜牧与兽医, 2012, 44(4): 38-40.
- [3] RADECKI S V, KU P K, BENNINK M R, et al. Effect of dietary copper on intestinal mucosa enzyme activity, morphology, and turnover rates in weanling pigs[J]. Journal of Animal Science, 1992, 70(5): 1424-1431.
- [4] NICHOLSON F A, SMITH S R, ALLOWAY B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England

- and Wales [J]. *Water & Environment Journal*, 2006, 31(1): 205–219.
- [5] 张辉, 李文凤, 赵盈盈, 等. 猪饲料中重金属对猪粪有机肥的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2018, 59(11): 2120–2122.
- [6] 黄小洋, 邵劲松, 马运涛. 施用猪粪有机肥对土壤环境质量的影响 [J]. *河南农业科学*, 2017, 46(11): 60–68.
- [7] 吴国英, 贾秀英, 郭丹, 等. 蚯蚓对猪粪重金属 Cu、Zn 的吸收及影响因素研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1293–1297.
- [8] 伏小勇, 秦赏, 杨柳, 等. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 78–83.
- [9] 孙越鸿, 吴永胜, 杨雪, 等. 蚯蚓对 6 种固体有机废弃物的处理效率研究 [J]. *现代农业科技*, 2018(7): 206–208, 211.
- [10] GAO L, WANG Z, LI S, et al. Bioavailability and toxicity of trace metals (Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn) in sediment cores from the Shima River, South China [J]. *Chemosphere*, 2018, 192: 31–42.
- [11] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价 [J]. *生态环境*, 2007, 16(5): 1551–1556.
- [12] 周吉奎, 刘勇, 刘牡丹, 等. 市政污泥中重金属赋存状态及生物有效性 [J]. *有色金属科学与工程*, 2017, 8(3): 99–102.
- [13] 成佐, 黄华. 土壤中重金属形态的分析研究进展 [J]. *广东化工*, 2017, 44(8): 147–148.
- [14] 仓龙, 李辉信, 胡锋, 等. 赤子爱胜蚓处理畜禽粪的最适湿度和接种密度研究 [J]. *农村生态环境*, 2002, 18(3): 38–42.
- [15] 王富强, 王海花, 张禹, 等. 蚯蚓处理热带农业废弃物木薯渣的可行性 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(6): 457–460.
- [16] 王富强, 王海花, 张禹, 等. 蚯蚓-木薯渣联合作用对热带城市污泥中重金属含量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(5): 437–441.
- [17] 中华人民共和国农业部. NY1377—2007 土壤 pH 的测定 [S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2007.
- [18] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进 BCR 法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1881–1884.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.11—2014 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督总局. GB 5009.12—2017 食品安全国家标准 食品中铅的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督总局. GB 5009.13—2017 食品安全国家标准 食品中铜的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] LAFABRIE C, MAJOR K M, MAJOR C S, et al. Trace metal contamination of the aquatic plant *Hydrilla verticillata* and associated sediment in a coastal Alabama creek (Gulf of Mexico-USA) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 68(1/2): 147–151.
- [23] 刘亚纳, 杨世关, 张百良. 赤子爱胜蚓处理猪粪的试验研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 816–819.
- [24] 贺欣. 污泥蚯蚓堆肥对重金属稳定及四环素的吸附影响研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [25] 周波, 唐晶晶, 代金君, 等. 蚯蚓作用下污泥重金属形态变化及其与化学生物学性质变化的关系 [J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6269–6279.
- [26] SIZMUR T, HODSON M E. Do earthworms impact metal mobility and availability in soil? – A review [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(7): 1981–1989.
- [27] 李文博. 重金属元素在污泥-蚯蚓-蚯蚓粪中的迁移转化研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [28] 吴国英, 贾秀英, 朱维琴. 蚯蚓富集猪粪中 Cu、Zn 的条件优化研究 [J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(8): 36–40.
- [29] 张泳桢. 蚯蚓对猪粪中重金属的富集作用及对动物的促生长和安全性研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- [30] 王振中, 张友梅, 胡觉莲, 等. 土壤重金属污染对蚯蚓 (*Opisthopora*) 影响的研究 [J]. *环境科学学报*, 1994, 14(2): 236–243.
- [31] 郭永灿, 王振中, 赖勤, 等. 株洲工业区土壤重金属污染与蚯蚓同工酶的研究 [J]. *应用生态学报*, 1995, 6(3): 317–322.
- [32] 顾文智, 刘文, 杨泽新, 等. 蚯蚓粪肥覆土对畦栽竹荪生产性状的影响 [J]. *陕西农业科学*, 2018, 64(7): 39–42.
- [33] 冯腾腾, 黄怀成, 陈飞, 等. 不同蚯蚓粪施用量对连作黄瓜农艺性状、产量和品质的影响 [J]. *南方农业学报*, 2018, 49(8): 1575–1580.
- [34] 吴珏, 李建勇, 刘娜. 蚯蚓粪有机肥对番茄产量、品质和土壤化学性质的影响 [J]. *上海农业学报*, 2018, 34(4): 16–19.
- [35] 单颖, 赵凤亮, 邵刚华, 等. 施用不同配比蚯蚓粪对海南耕地砖红壤肥力特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2017, 32(S1): 338–342.
- [36] 吴春童, 朱紫娟, 刘纯, 等. 蚯蚓粪作为贫瘠土壤快速培肥改良剂的效果研究 [J]. *现代农业科技*, 2018(13): 191–195.

- [37] 陈楠. 不同施肥处理对土壤重金属的影响[J]. 农业与技术, 2018, 38(21): 14-16.
- [38] 贺旭红. 生物修复和微生物矿化在重金属污染土壤处理中的研究进展[J]. 科技创新与应用, 2018(23): 66-68.
- [39] 朱四琛, 孙永军, 孙文全, 等. 絮凝法在重金属废水处理中的研究进展与应用[J]. 净水技术, 2018, 37(11): 40-50.
- [40] 杨远廷, 董小英, 唐胜球. 饲料中添加蚯蚓粉影响獭兔繁殖性能的初步研究[J]. 广东饲料, 2018, 27(4): 27-29.
- [41] 李荣妮, 唐瑞波, 朱莉飞, 等. 饲料中添加蚯蚓粉和蚯蚓粪对罗非鱼生长及血清抗氧化指标的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(2): 233-238.
- [42] 郭瑞萍, 肖发沂, 李文晶, 等. 蚯蚓粉对寿光鸡生产性能和肉品质的影响[J]. 中国饲料, 2018(11): 39-44.
- [43] 钟云平, 雷小文, 金恒, 等. 饲喂蚯蚓液对公番鸭肌肉品质的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(12): 66-69.

Effect of Earthworms on Enrichment of Heavy Metals in Pig Manure

HUANG Wei^{1,2}, DIAO Xiaoping^{2,3}, LI Sennan^{1,2}, GONG Ying^{1,2}

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

2. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

3. Hainan Normal University, Haikou, Hainan 571158, China)

Abstract: Pig manure separated from the dry and the wet was used as substrate, inoculated with earthworms (*Eisenia fetida*) and cultured indoors for 4 weeks. The contents of heavy metals (Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, As) in the pig manure and earthworms were determined by the inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The speciation changes in the pig manure and the enrichment of heavy metals in the earthworms were systematically analyzed under the action of the earthworms. The experimental results showed that the pig manure promoted the growth of earthworms, increased the body weight of the earthworms obviously after 4 weeks of treatment and had no effect on the reproduction of the earthworms. After 4 weeks of earthworm treatment, the pH value of the pig manure increased from 6.51 to 6.86. The total amount of Cu, Zn, Cr, Pb, Cd and As in the pig manure decreased by 13.69%, 24.47%, 30.70%, 39.17%, 21.91% and 9.36%, respectively, compared with the control group. Meanwhile, the proportion of Zn, Cr and Cd in the pig manure decreased by 15%, 27% and 27%, respectively compared with the control group. The earthworms had a certain effect on enrichment of heavy metals. The concentrations of Cu, Zn, Cd and As, except for Cr, in the earthworms increased by 0.49 mg · kg⁻¹, 3.86 mg · kg⁻¹, 0.012 mg · kg⁻¹ and 0.064 mg · kg⁻¹, respectively compared with those before the experiment, and showed a time-effect relationship. The biota-sediment accumulation factors increased in the order of Tr > Cd > Zn > Cu > As. This indicates the earthworms can enrich heavy metals and reduce the content of heavy metals in the pig manure and the proportion of heavy metals in the form of residue in the pig manure, which is conducive to the transfer and removal of heavy metals.

Keywords: Earthworm; pig manure; heavy metal; enrichment

(责任编辑: 潘学峰)