

鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响

吴清清^{1,2}, 马军伟², 姜丽娜², 叶 静², 王 强², 汪建妹², 俞巧钢², 孙万春², 符建荣²

(1.浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004; 2.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘 要:采用盆栽试验,在红壤和潮土中分别施入土壤重量 5%、10%和 15%的鸡粪或垃圾有机肥,研究其对苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)生长、土壤化学性状及重金属含量的影响。结果表明,与对照相比,施入鸡粪或垃圾有机肥显著增加苋菜的鲜重、主根长和株高;土壤有机质、EC 值、速效磷和速效钾含量均大幅增加,但土壤全氮含量无明显变化。与对照相比,潮土中施用两类有机肥使苋菜植株 Cu 和 Zn 含量分别增加 26.3%~36.0%和 1.2%~20.3%,但未超出国家食品卫生标准对 Cu 和 Zn 的允许含量;Cd、Cr 和 Pb 含量都较对照降低,没有出现积累现象。红壤施用两类有机肥,苋菜植株中 Zn、Cd 和 Pb 分别下降 42.7%~59.9%、0~48.9%和 4.1%~71.3%,达到显著水平。有机肥的施入量为 5%时,两类土壤中重金属都没有出现明显积累;当施入量为 10%和 15%时,两类土壤的 Cu、Cd、Cr 和 Pb 含量显著增加,出现明显积累趋势,其中除了施用鸡粪使土壤有效 Cu 含量下降外,两种有机肥均增加了两类土壤中重金属 Zn、Cd、Cr 和 Pb 的有效态含量。试验结果提示,从土壤培肥与环境质量安全综合考虑,有机肥的用量应控制在一个适宜范围内。

关键词:鸡粪;生活垃圾;重金属积累;苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1302-08

Effect of Poultry and Household Garbage Manure on the Growth of *Amaranth tricolor* L. and Heavy Metal Accumulation in Soils

WU Qing-qing^{1,2}, MA Jun-wei², JIANG Li-na², YE Jing², WANG Qiang², WANG Jian-mei², YU Qiao-gang², SUN Wan-chun², FU Jian-rong²
(1.College of Chemistry and Life Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2.Institute of Environmental Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: Excessive application of organic manure could result in potential threat to environment. This study was conducted with pot culture on red earth and fluvo-aquic soil received poultry and household garbage manure with the rates of 5%, 10% and 15% of soil weight in order to explore the effects of poultry and household garbage manure on the growth of amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) and soil chemical properties as well as soil heavy metal content. The results showed that almost all the treatments received organic manure obviously increased the fresh leaf yield, main root length and plant height of amaranth as well as OM, EC, available P and exchangeable K in soils except of soil total N. The Cu and Zn concentrations in amaranth plants on fluvo-aquic soil increased by 26.3%~36.0% and 1.2%~20.3%, respectively, as compared with control, but the concentrations didn't exceed National Food Standard for the permission of Cu and Zn content in vegetables, while the concentrations of Pb, Cr and Cd in amaranth plants decreased. The concentrations of Zn, Pb and Cd in amaranth plants in the treatments received organic manure on red earth decreased by 42.7%~59.9%, 0~48.9% and 4.1%~71.3%, respectively, as compared with control ($P < 0.05$). When the treatments received 5% organic manure on red earth and fluvo-aquic soil no obvious heavy metal accumulation in amaranth plants was found. On the contrary, the treatments received 10% and 15% organic manure could obviously increase the contents of available Zn, Cd, Cr and Pb in red earth and fluvo-aquic soil, except of available Cu in the treatment received poultry on two soils. From the comprehensive consideration of soil fertility and environmental quality safety, a proper application rate of organic manure is necessary.

Keywords: poultry; household garbage; heavy metal accumulation; *Amaranth tricolor* L.

收稿日期:2009-12-10

基金项目:浙江省重大科技专项社会发展重点项目(2006C13036);国际科技合作项目(2006DFA92920)

作者简介:吴清清(1986—),女,浙江永嘉人,在读硕士,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail:qingqing272@163.com

通讯作者:符建荣 E-mail:fujr@mail.hz.zj.cn

禽畜粪和生活垃圾用作有机肥在我国具有悠久的历史,在农业生产中发挥着重要的作用。随着现代农业的发展和人民生活水平的提高,禽畜粪和生活垃圾排放量不断增加,但利用率却不断下降^[1]。畜禽粪和生活垃圾中可腐解部分含有丰富的作物所需的养分,将其施入农田是最直接、最有效的资源化利用措施,不仅能够提高土壤肥力,实现养分再循环,而且对于减少化肥的施用,保护生态环境,推动农业可持续发展具有十分重要的意义。

随着集约化养殖的发展和人民生活水平的提高,禽畜粪和生活垃圾的成分已发生明显变化。李书田^[2]调查结果表明,与上个世纪 90 年代相比,现在的鸡粪、猪粪、牛粪中氮素含量变化不大,磷和钾含量明显增加,Cu 和 Zn 含量在猪粪和鸡粪中增加尤为明显,最大增加幅度达到了 12 倍,其农用可能对作物和土壤造成的危害已引起学者的广泛关注。生活垃圾成分复杂,其中重金属污染是生活垃圾农用的最大风险。不少研究认为长期施用畜禽粪和生活垃圾会导致 Cu、Zn 和 Pb 等重金属在土壤中的累积^[3-4]。但以往研究大多集中在施有机肥对土壤重金属总量积累的影响,而对施入土壤中重金属有效性变化的探讨相对较少。为此,本试验以土壤 pH 差异较大的红壤和潮土为材料,采用盆栽试验研究鸡粪和垃圾有机肥不同施用量对苋菜生长、土壤理化性状的影响,同时探讨两类土壤-植物系统中重金属累积及有效性变化,为有机肥的合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤与有机肥

供试土壤分别取自浙江衢州柯城区的红壤及慈溪市的潮土。红壤 pH5.35、有机质 13.1 mg·kg⁻¹、全氮 0.242%、全磷 0.11%、全钾 1.51%;潮土 pH8.5、有机质 12.5 mg·kg⁻¹、全氮 0.156%、全磷 0.094%、全钾 1.394%。土壤经风干、磨碎、过 1 mm 筛作盆栽试验。

试验所用的鸡粪有机肥为慈溪市慈生态肥料有限公司按生物发酵法堆制的鸡粪商品有机肥。垃圾有机肥制作于丽水莲都区碧湖镇垃圾中转站。生活垃圾经分拣去除金属、玻璃、瓦砾和塑料等杂物后,其主

要成分是粉尘、厨余垃圾和植物残体等,然后将分选后的可腐解垃圾用破碎机打碎,再通过混化酸解无害化处理,最终形成黑色颗粒状有机肥。供试两种有机肥的基本性状如表 1 所示。

1.2 供试蔬菜品种

供试蔬菜品种为一点红苋菜。

1.3 试验设计

盆栽试验于 2009 年 5 月 13 日至 2009 年 6 月 19 日在浙江省农科院的玻璃房内进行。试验设 8 个处理:化肥(NPK)按当地常规施肥;低量鸡粪有机肥(LOM1);中量鸡粪有机肥(MOM1);高量鸡粪有机肥(HOM1);低量垃圾有机肥(LOM2);中量垃圾有机肥(MOM2);高量垃圾有机肥(HOM2);CK(不施肥)。盆栽试验前,取未混入肥料的红壤和潮土原始土样作为种植前(Initial)土样;然后用塑料盆每盆装土 5 kg,化肥处理每盆施入尿素 4.7 g、过磷酸钙 4.3 g 和硫酸钾 2.4 g;而低量、中量和高量分别是加入风干土壤重量 5%、10%、15%的有机肥,不施化肥。土壤与肥料充分混匀后装盆,加水至田间持水量 70%,平衡 1 周后,采用点播法播种。期间不再施肥,各处理日常管理一致。

1.4 取样与项目测定方法

取样方法:苋菜收获后,取苋菜植株样品和盆栽土壤样品。土壤样品中有少量施用的鸡粪有机肥未完全融合于土壤中,在土壤测定时挑去;而由于垃圾有机肥经过打碎和酸解处理,为细颗粒状,因此能较好地融合于土壤。此外,试验期为 5 月至 6 月,温室保持较高的温度,这对于促进有机肥的分解起了一定作用。

苋菜农艺性状的测定:苋菜收获后,每盆取 5 株有代表性的苋菜分别测定株高、主根长和鲜重。株高和主根长的测定采用直接测定法,用小铲子把植株挖出来,然后用直尺量取苋菜株高和主根长。

土壤 pH 值采用(水土比 2.5:1)电位法测定;EC 值采用(水土比 5:1)DDS-307 电导率仪测定;有机质测定采用重铬酸钾-容量法;全氮测定采用开氏法;速效磷测定采用碳酸氢钠法;速效钾测定采用乙酸铵提取,PerkinElmer AAS 800 原子吸收仪测定。

苋菜植株重金属 Cu、Zn、Cd、Cr 和 Pb 的测定采

表 1 供试有机肥基本性状

Table 1 Basic properties of organic manures used

有机肥	pH	有机质/%	全氮/%	全磷/P ₂ O ₅ %	全钾/K ₂ O%	EC/mS·cm ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹
鸡粪	7.68	35.34	2.12	3.11	2.60	3.610	30.72	152.16	43.80	2.16	54.75
垃圾	7.98	13.13	0.19	1.61	3.18	5.190	34.33	383.38	28.97	4.25	150.25

用硝酸-高氯酸消解;土壤重金属 Cu、Zn、Cd、Cr 和 Pb 总量的测定采用硝酸-氢氟酸-高氯酸消解^[5], PerkinElmer AAS 800 原子吸收仪测定。

土壤重金属 Cu、Zn、Cd、Cr 和 Pb 有效态的测定采用 Tessier 连续提取法^[6],分别用 $MgCl_2$ 、NaAc 和含 $NH_2OH \cdot HCl$ 的 HAc 溶液提取交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态重金属,PerkinElmer AAS 800 原子吸收仪测定。由于这 3 种形态的重金属较不稳定,取三者之和作为重金属有效态含量。

1.5 统计分析

所有数据采用 Excel 和 SPSS 分析,平均数采用 LSD 比较。

2 结果与分析

2.1 两种有机肥对苋菜农艺性状的影响

已有的研究表明,施用鸡粪或垃圾有机肥能增加土壤肥力,为植株生长提供充足养分,因而利于作物的生长^[7-9];但同时也有报道指出,禽畜粪中含有抗氧化剂、霉菌抑制剂和抗生素等有机物质,不当施用对微生物具有毒性,对土壤产生不良影响,从而抑制作物生长^[10-11]。本试验结果表明,不同施肥处理对苋菜生长有较大影响,不施肥对照处理的苋菜长势矮小,茎秆细弱;而施化肥和两种有机肥处理的苋菜植株相对高大,茎秆相对粗壮。由表 2 可见,红壤和潮土中所有施肥处理苋菜鲜重均显著高于对照,且随着有机肥施入量的增加而增加,其中 15% 有机肥处理苋菜鲜重最高,分别比对照处理增加 7.45 和 5.49 倍。垃圾有机肥与鸡粪有机肥比较,效果略差。从根长上看,两类土壤中,所有施肥处理苋菜根长较无肥对照处理都显著增长。从株高上看,与无肥对照相比,两类土壤中所有施

肥处理的苋菜株高出现不同程度的增加。

2.2 两种有机肥对土壤化学性状的影响

施用有机肥对土壤 pH 的影响因土壤种类不同而有差异。从总体趋势看,与未混入肥料的种植前原始土壤(Initial)相比,潮土施用有机肥后其 pH 下降(表 3),这是因为有机肥中含有有机酸等多种功能结构基团,使得潮土壤 pH 下降。此外,苋菜生长过程中,其根系分泌物对土壤 pH 下降也起一定作用。与无肥对照相比,潮土施用 10% 和 15% 的鸡粪有机肥后其 pH 略有下降,而施用垃圾有机肥后其 pH 显著增加,这是因为垃圾有机肥本身高 pH 对土壤 pH 产生直接的作用。红壤施用鸡粪和垃圾有机肥后其 pH 较对照都显著提高,其中施用垃圾有机肥处理 pH 增加更为明显,这与红壤本身 pH 偏低,施用有机肥对其 pH 产生较大的直接影响有关。可见,施用有机肥能将土壤 pH 矫正到适合作物生长的范围。

表 3 表明,除 5% 用量外,两类土壤施有机肥处理后有机质含量都显著提高。15% 鸡粪处理潮土和红壤有机质含量分别是对照处理的 3.67 和 4.18 倍,而 15% 垃圾处理潮土和红壤有机质含量分别是对照的 1.56 和 1.90 倍,这与鸡粪肥中有机质含量较高有关。施肥对土壤全氮含量无显著影响,而土壤有效磷、有效钾含量显著增加。值得注意的是,15% 鸡粪肥处理的潮土和红壤有效磷达 $80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $90.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别是种植前的 8.6 倍和 1.6 倍之多。这与 Eghball 等^[12]研究结果类似,超量施用粪便有机肥有发生磷污染的危险。综上所述,施用鸡粪或垃圾肥都能增加土壤有机质、速效钾含量,改善土壤肥力。但如果施用量过大或施用不当,鸡粪中含量过高的磷易造成土壤磷富集,并易通过渗透及地表径流造成地下水、地

表 2 施用有机肥对苋菜农艺性状的影响

Table 2 Effect of organic manure on the agronomic characters of amaranth

处理	5 株鲜重/g		主根长/cm		株高/cm	
	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤
CK	6.34±1.31 c	4.81±0.71 c B	4.70±0.42 b	3.15±0.21 cC	8.40±0.99 cC	11.45±0.07 cB
NPK	13.13±0.64 bc	16.54±1.46 b B	5.04±1.19 b	5.70±0.71 bB	11.45±3.61 cBC	13.2±1.70 cB
LOM1	22.76±2.76 b	28.65±0.65 ab AB	6.95±1.06 a	7.70±0.28 aA	22.00±0.14 aA	19.95±1.06 aA
MOM1	25.62±2.23 ab	26.68±3.21 ab AB	6.85±0.21 a	6.85±0.64 abAB	16.90±0.99 bB	16.70±0.99 bAB
HOM1	37.30±12.63 a	31.72±9.67 ab AB	7.98±0.59 a	7.25±0.07 abAB	19.00±0.85 abAB	18.15±0.35 abA
LOM2	19.34±0.06 bc	14.08±0.06 bc B	7.00±0.28 a	5.70±0.28 bB	18.10±0.28 bAB	13.20±0.28 cB
MOM2	17.41±5.84 bc	24.02±5.20 b AB	7.20±0.42 a	6.40±0.28 bB	16.30±1.13 bBC	15.85±0.07 bcAB
HOM2	34.80±6.55 ab	35.83±7.10 a A	7.55±0.64 a	7.55±0.07 aAB	18.90±2.40 abAB	18.50±2.97 abA

注:不同大、小字母表示处理间差异达 1% 和 5% 显著水平,下同。

Note: Different capital and lowercase letters mean significant 1% and 5% level, respectively. The same below.

表 3 施用有机肥对土壤 pH 及养分含量的影响
Table 3 Effect of organic manure on the pH and nutrients in soil

处理	pH		有机质/%		全氮/%		有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤
Initial	8.50a	5.35d	1.31c	1.25c	0.14b	0.16a	9.3 e	57.9 d	123.2e	131.2d
CK	8.14b	4.95d	1.22c	1.33c	0.11b	0.13a	9.6 e	51.3 d	116.5d	107.1d
NPK	7.95b	4.75d	1.19c	1.33c	0.14b	0.17a	11.9 d	55.7 d	220.5e	262.4c
LOM1	8.24a	6.05c	1.79b	2.55b	0.13b	0.16a	44 c	60.1 c	381.8c	546.7c
MOM1	8.04b	6.50c	3.21a	3.04b	0.19b	0.20a	79.1 b	74.9 b	1094.0b	1066.0b
HOM1	7.86b	6.83b	4.80a	5.22a	0.28a	0.21a	80.0 a	90.1 a	1693.0a	1437.0a
LOM2	8.38a	7.24b	1.45b	1.79c	0.14b	0.13a	19.3 d	56.9 d	375.2c	499.6c
MOM2	8.43a	7.72a	1.68b	1.86c	0.17b	0.12a	26.4 d	58.1 d	881.8b	914.4b
HOM2	8.45a	7.97a	2.05b	2.38b	0.19b	0.17a	32.4 c	63.8 c	1214.0b	1409.0a

表水的污染。

2.3 两种有机肥对土壤 EC 的影响

不同施肥处理土壤 EC 值如图 1 所示。收获后, 施化肥和有机肥处理土壤的 EC 值均较无肥对照大幅增加, 且随着施肥量增加而显著上升。施入 15% 鸡粪肥和 15% 垃圾肥的潮土 EC 值分别达 $1.145\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $1.197\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。研究表明, EC 值过高会使土壤发生盐渍化^[13], 使植物受到损伤, 甚至出现植物根系的死亡。土壤正常 EC 值为 $1\sim4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 本试验中, 虽然施肥土壤 EC 值较对照显著升高, 但即使施入 15% 的有机肥, 土壤 EC 值仍在正常范围。

2.4 两种有机肥对苋菜重金属含量的影响

植物对土壤重金属的吸收受多方面因素的影响, 包括土壤重金属含量、重金属有效态含量、土壤 pH 和有机质含量等^[14]。施有机肥对作物重金属含量增加或减少的情况都有报道。本次试验中, 不同施肥处理苋菜重金属含量如表 4 所示。与对照相比, 潮土中施入 5%、10% 和 15% 鸡粪和垃圾有机肥均增加苋菜植株中重金属 Cu 和 Zn 的含量, 分别增加 26.3%~

36.0% 和 1.2%~20.3%。Cu 和 Zn 是植物生长的必需微量元素, 但过量的 Cu 和 Zn 也会对作物产量和品质产生影响。国家食品卫生标准对 Cu 和 Zn 的允许含量分别是 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 本试验苋菜植株中 Cu 和 Zn 都没有超标。随着施肥量的增加, 苋菜植株中 Pb、Cr 和 Cd 含量呈增加趋势, 但与对照相比, 其含量均有降低。其中施 10% 的鸡粪或垃圾肥的苋菜 Pb 含量最低, 比对照分别下降 68.8% 和 71.9%。

红壤中生长的苋菜植株重金属含量受施肥影响更为明显。鸡粪处理苋菜 Cu 含量与对照相当, 但 10% 和 15% 垃圾处理使苋菜 Cu 含量显著下降, 且随着垃圾施入量的增加而降低; 施两类有机肥都显著降低苋菜 Zn、Pb 和 Cd 的含量, 分别下降 42.7%~59.9%、0~48.9% 和 4.1%~71.3%; 各处理 Cr 含量差异不显著。两类有机肥使红壤苋菜 Zn、Pb 和 Cd 的含量显著下降, 可能原因是: 两类有机肥显著增加红壤 pH, 使重金属被钝化, 从而使其活性降低^[10]; 施用有机肥增加苋菜生物量, 进而使苋菜重金属含量得到一定稀释。

2.5 两种有机肥对土壤重金属含量的影响

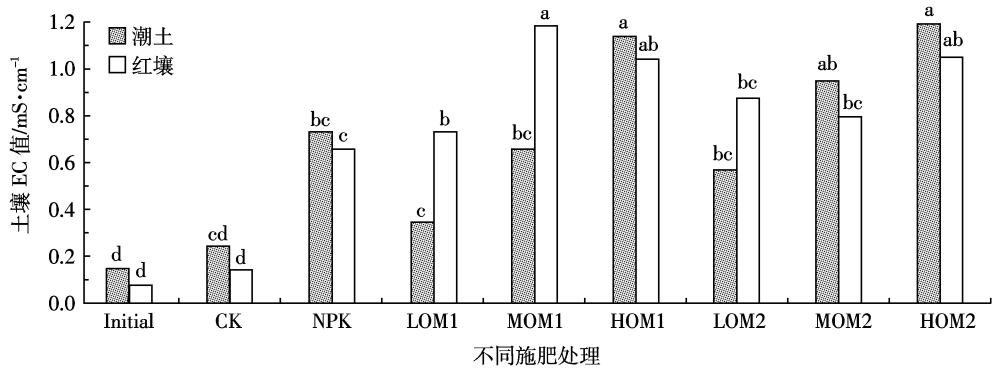


图 1 施用有机肥对土壤 EC 值的影响

Figure 1 Effect of organic manure on the EC in soil

表 4 施用有机肥对苋菜(鲜重)重金属含量的影响

Table 4 Effect of organic manure on the heavy metal concentration of amaranth(fresh weight)

处理	Cu/mg·kg ⁻¹		Zn/mg·kg ⁻¹		Pb/mg·kg ⁻¹		Cr/mg·kg ⁻¹		Cd/mg·kg ⁻¹	
	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤
CK	0.524 b	0.982 a	3.398 c	11.811 a	0.830a	1.259 a	0.457 a	0.436 a	0.013 ab	0.122 a
NPK	0.608 b	0.991 a	3.349c	12.536 a	0.783 ab	1.108 a	0.291 bc	0.382 a	0.013 a	0.071 c
LOM1	0.584 b	0.898 a	3.439 c	6.769 c	0.756 ab	1.193 a	0.190 c	0.352 a	0.011 b	0.035 d
MOM1	0.662 ab	0.948 a	3.454 c	5.625 e	0.233 c	1.257 a	0.259 bc	0.434 a	0.010 b	0.081 b
HOM1	0.713 a	0.807 b	3.439 c	4.786 g	0.526 ab	0.858 b	0.249 bc	0.460 a	0.010 b	0.090 ab
LOM2	0.610 b	1.035 a	3.814 b	6.298 e	0.632 ab	0.782 bc	0.320 b	0.337 a	0.010 b	0.078 c
MOM2	0.582 b	0.805 b	4.088 a	5.054 f	0.259 bc	0.855 ab	0.320 b	0.435 a	0.010 b	0.117 ab
HOM2	0.572 b	0.761 b	3.824 b	4.742 g	0.769 ab	0.585 ab	0.344 b	0.453 a	0.010 b	0.117 ab

鸡粪有机肥和垃圾有机肥本身含有重金属,施入土壤可能会引起土壤中重金属的积累^[15]。苋菜收获后,各处理土壤的 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 含量如表 5 所示。除重金属 Zn 外,施有机肥特别是 15%有机肥显著增加土壤 Cu、Pb、Cr 和 Cd 含量。这可能是因为苋菜生长过程中吸收的 Zn 大于肥料带入土壤的 Zn,而苋菜对 Cu、Pb、Cr 和 Cd 吸收的量少于肥料引入的相应重金属含量。土壤重金属含量随施肥量增加而增加。将两类有机肥处理土壤重金属含量进行比较,土壤 Cr 含量增量为鸡粪处理高于垃圾处理;而土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 元素增量为垃圾处理高于鸡粪处理,这与垃圾肥中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量较高,而鸡粪中 Cr 含量较高有关。

施 10%和 15%鸡粪或垃圾有机肥处理都造成土壤有害重金属 Pb、Cr 和 Cd 不同程度的积累。国家土壤环境质量标准对 Pb、Cr、Cd 含量的二级标准^[17]分别是 250、150、0.30 mg·kg⁻¹。对照此标准,收获后两类有机肥处理的土壤 Pb 和 Cr 含量虽有增加,但都在标准之内;而部分土壤 Cd 含量超过 0.30 mg·kg⁻¹ 的标准,

其中施用 10%和 15%鸡粪或垃圾肥处理土壤 Cd 含量增加明显。15%垃圾肥分别使红壤和潮土中 Cd 含量增加 0.085 mg·kg⁻¹ 和 0.244 mg·kg⁻¹。因此,从作物生长和环境质量结合考虑,垃圾有机肥由于 Cd 含量较高,在农田中需谨慎施用。

2.6 两种有机肥施用后土壤重金属有效态含量的变化

土壤重金属有效态一般认为是指土壤中理化性质活泼、易被植物吸收的那部分重金属。测定土壤重金属有效态含量可以预测重金属的生物有效性和毒性。Tessier 连续提取法^[6]是分析重金属形态的经典方法,将重金属分为交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 5 种。本文根据 Tessier 的观点,将其中交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态统称为重金属的有效态^[19]。

土壤有效态 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 含量如图 2 所示。苋菜收获后与种植前土壤比较,无论是施用鸡粪或是垃圾有机肥,两种土壤中有效态 Cu 的含量均有所降低,最大降幅分别达 53.3%和 51.9%。与不施肥的对照比较,施用鸡粪处理两类土壤中有效态 Cu 含

表 5 施用有机肥对土壤重金属含量的影响

Table 5 Effect of organic manure on the heavy metal concentration in soil

处理	Cu/mg·kg ⁻¹		Zn/mg·kg ⁻¹		Pb/mg·kg ⁻¹		Cr/mg·kg ⁻¹		Cd/mg·kg ⁻¹	
	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤	潮土	红壤
Intial	36.23 a	52.11c	173.14 a	167.20 b	30.19c	46.00 d	19.45 eDE	24.37d	0.25 a	0.27 c
CK	34.78 a	57.60 bc	107.52 c	125.89 b	28.02 c	45.54 d	19.28 dD	27.18 c	0.27 a	0.24 c
NPK	34.11 a	40.49 c	105.42 c	104.02 b	28.18 c	39.66 e	18.21 eDE	27.05 c	0.29 a	0.21 c
LOM1	38.07 a	54.52 bc	109.83 c	105.95 b	28.35c	52.80 d	23.52 eDE	24.93 d	0.29 a	0.27 c
MOM1	40.63 a	60.51 ab	112.04 bc	113.63 b	34.41 c	59.11 cd	33.73 bB	29.78 d	0.35 a	0.35 bc
HOM1	40.79 a	60.42 b	122.37 b	144.31 b	47.62 b	61.49 c	48.98 aA	37.12 a	0.36 a	0.38 b
LOM2	44.37 a	67.10 ab	124.1 8b	188.29 a	40.73 b	76.45 bc	14.59 fE	24.04 c	0.34 a	0.41 b
MOM2	52.57 a	70.65 ab	156.62 ab	202.08 a	49.72 a	80.09 b	18.33 eDE	28.72 b	0.38 a	0.48 ab
HOM2	53.34 a	78.63 a	170.49 ab	220.12 a	56.75 a	96.49 a	26.89 cC	30.58 c	0.35 a	0.49 a

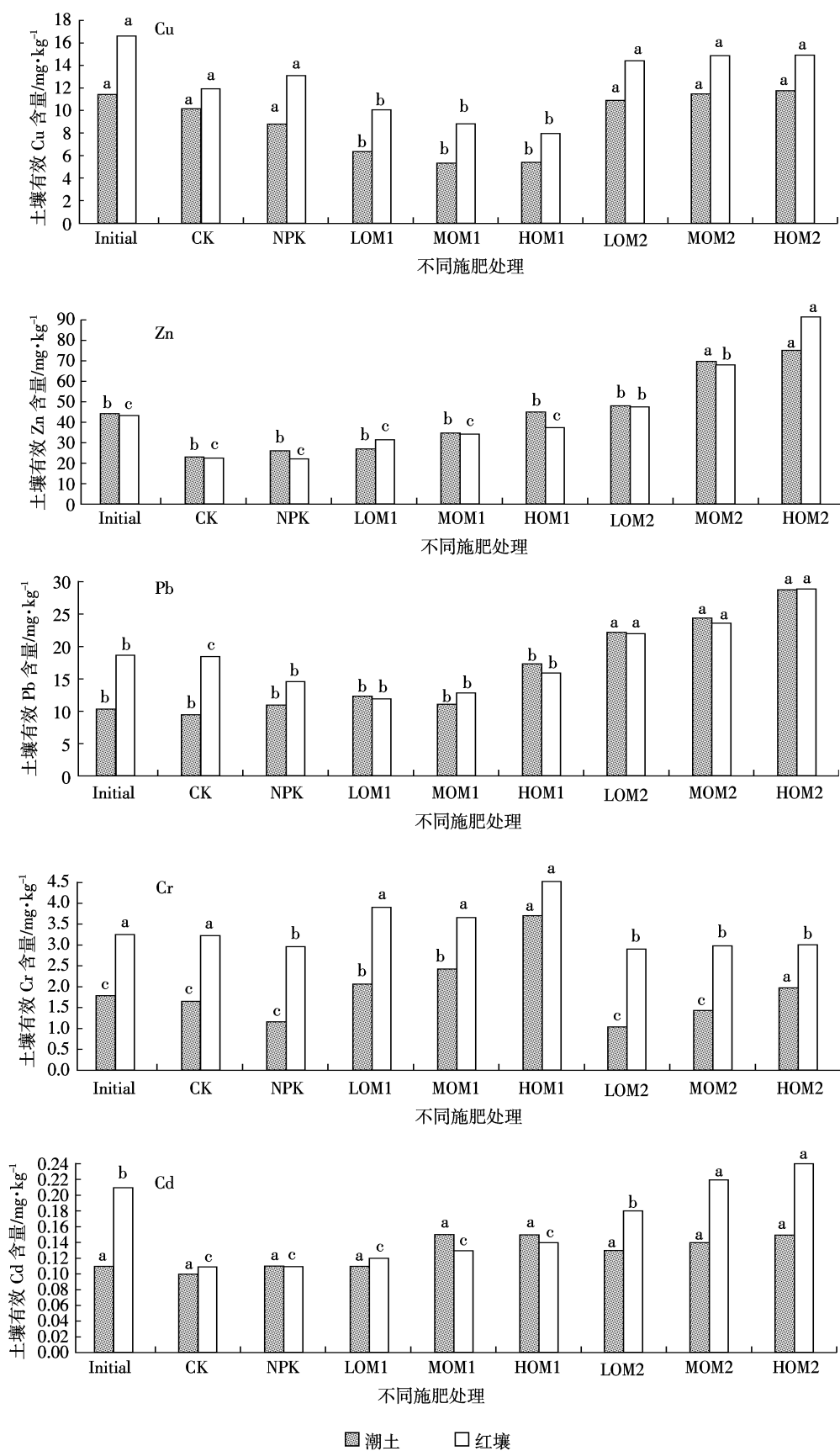


图2 施用有机肥对土壤重金属有效态含量的影响

Figure 2 Effect of organic manure on the available heavy metal concentration in soil

量明显较低,降幅分别为37.3%~47.1%和15.6%~33.0%;垃圾处理土壤有效态Cu含量比对照有所增加,增幅分别为7.7%~15.5%和21.1%~25.1%。供试的两种有机肥含Cu量接近。造成上述差异的原因可能与施用鸡粪的苋菜生物量大于施用垃圾处理,随作物带走的有效Cu量大有关。

土壤Zn、Pb、Cd的有效态含量的变化情况类似,总的趋势是,与不施肥处理比较,施用有机肥后土壤重金属Zn、Pb、Cd的有效态含量增加,而且随着肥料用量的增加而增加的趋势明显,这与姚丽贤^[9]试验结果一致。与种植前比较,施用鸡粪有机肥后土壤中Zn、Pb、Cd的有效态含量与种植前持平或略有下降,而垃圾有机肥施用后,上述3种重金属有效态均有明显增加,尤其是高量施用有机肥处理,一方面是由于垃圾有机肥中这3种重金属含量较鸡粪高,另一方面与鸡粪的肥效高于垃圾肥、较高的作物生物量携走较多重金属量有关。

有机肥对土壤中有效态Cr含量的影响与其他重金属有所不同,苋菜收获后,与未混入肥料的种植前原始土壤相比,鸡粪处理的两类土壤有效态Cr含量升高,而垃圾处理土壤有效态Cr含量则较种植前下降。与对照相比,5%和10%的垃圾有机肥处理土壤有效Cr含量与对照无显著差异,而15%垃圾有机肥和所有鸡粪处理的两类土壤有效Cr含量均显著提高。这一结果与鸡粪有机肥中Cr的含量比垃圾有机肥要高是相互印证的。

3 讨论

禽畜粪和生活垃圾等有机物料农用是实现农业生态系统连续性的重要措施。但当前禽畜粪和生活垃圾中含有较多的重金属、抗生素和有害生物等,若不经无害化处理,直接应用于农业生产,绿色农业和无公害产品就无从谈起^[10]。本试验施用的鸡粪和垃圾有机肥均显著增加苋菜的生物量、株高和主根长,即使施入土壤质量15%的鸡粪或垃圾有机肥,苋菜生长也没有出现抑制现象。这可能是因为试验所用鸡粪和垃圾有机肥已经过高温堆肥和化学法无害化处理,其对作物生长抑制作用较小。

施用有机肥对土壤结构和理化性质产生影响,进而影响土壤中重金属的迁移转化。已有研究表明,施用有机肥对土壤中重金属的生物有效性有两个截然相反的影响。一方面,有机肥中的腐殖质通过络合、螯合反应,固定重金属,进而降低重金属对作物的有效

性。华路^[20]研究表明,有机肥中的胡敏酸、胡敏素与金属离子形成的络合物是不易溶的,能显著降低植物吸收土壤中的重金属元素。Chang C^[21]指出牛粪能降低土壤重金属有效性,因为重金属与有机物质形成不可溶性盐,如磷酸盐或其他。另一方面,施用有机肥料具有提高土壤重金属有效性的作用。因为有机肥本身携带的重金属的生物有效性较强,且有机物腐解过程对土壤强结合态重金属具有活化效应^[22]。陈同斌^[23]研究了水溶性有机质(DOM)对土壤中镉吸附行为的影响,发现DOM对土壤中Cd的吸附行为具有明显的抑制作用。也有研究表明,富里酸与重金属形成的络合物较易溶,而且新生的腐殖质络合物比老化的腐殖质易溶。畜禽粪便能增加土壤重金属的移动性,因为其所含有机酸能与金属结合形成水溶性化合物或胶体;而且有机酸能降低土壤pH,增加金属可溶性。

本次试验中,施用鸡粪和垃圾有机肥均增加潮土和红壤中有效态Zn、Cd、Cr和Pb含量,这与上述施用有机肥对土壤重金属有效性分析中第二个方面的影响效应一致。可见,虽然施高量鸡粪或垃圾有机肥能获得较高产量,但显然不能仅以产量来确定有机肥料的合理用量。由于现代集约化养殖畜禽粪和生活垃圾含有多种有害重金属,计算其施用量时应对其主要组分可能对作物和环境产生的效应进行全面考虑。

4 结论

(1)施用鸡粪和垃圾有机肥对两类土壤中苋菜生长均有明显的促进作用,鸡粪有机肥肥效高于垃圾有机肥。潮土中生长的苋菜可食部分所含微量元素Cu和Zn含量增加,有害重金属Cd、Cr和Pb并没有出现积累。

(2)施用鸡粪和垃圾有机肥都降低碱性潮土的pH、提高红壤pH。施用鸡粪和垃圾肥都能增加土壤有机质、有效磷、速效钾含量。但鸡粪中磷含量较高,若连续大量施用大量鸡粪会造成土壤磷过量富集。

(3)施用鸡粪或垃圾肥对土壤Zn含量影响不大,但显著增加土壤Cu、Cd、Cr和Pb含量。一季作物施入土壤重量5%的鸡粪或垃圾有机肥,土壤中Cu、Cd、Cr和Pb总量与对照无显著差异,当用量超过10%时,土壤Cu、Cd、Cr和Pb总量显著提高,出现明显积累的趋势。除鸡粪处理土壤有效Cu含量下降外,施有机肥均增加了两类土壤有效态Zn、Cd、Cr和Pb的含量。

参考文献:

- [1] 孙永明, 李国学, 张夫道, 等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 169-173.
SUN Yong-ming, LI Guo-xue, ZHANG Fu-dao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(8): 169-173.
- [2] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184.
- [3] 黄治平, 徐斌, 张克强, 等. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 239-244.
HUANG Zhi-ping, XU Bin, ZHANG Ke-qiang, et al. Accumulation of heavy metals in the four years' continual swine manure-applied greenhouse soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 239-244.
- [4] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 105-108.
WANG Kai-feng, PENG Na, WANG Kai-rong, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 105-108.
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999.
LU Ru-kun. Methods of analysis for soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [6] Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Anal Chem*, 1979, 51: 844-851.
- [7] 叶静, 安藤丰, 符建荣, 等. 几种新型有机肥对菜用毛豆产量、品质及化肥氮利用率的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 34(3): 289-295.
YE Jing, Ho Ando, FU Jian-rong, et al. Effects of new organic manures on yield, quality and N use efficiency of green soybean [J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Sci)*, 2008, 34(3): 289-295.
- [8] 马琨, 王兆骞, 杜茜, 等. 城市生活垃圾堆肥对春小麦生长和土壤的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 312-314.
MA Kun, WANG Zhao-qian, DU Qian, et al. Effect of municipal refuse compost to the growth of spring-wheat and the soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(5): 312-314.
- [9] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓. 施用禽畜粪对两种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 128-135.
YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-huan. Bioavailability of As, Cu, and Zn in two soils as affected by application of two types of animal manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 128-135.
- [10] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 822-829.
- [11] Gupta G, Gardner W. Use of clay mineral (montmorillonite) for reducing poultry litter eachate toxicity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 118(1): 81-83.
- [12] Eghball B. Soil properties as influenced by phosphorus and nitrogen based manure and compost applications[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 94: 128-135.
- [13] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 连续施用鸡、鸽粪对菜心产量与品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 565-570.
YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-heng, et al. Yield and quality of flowering Chinese cabbage as influenced by successive application of chicken and pigeon manure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 565-570.
- [14] 张乃明. 土壤-植物系统重金属污染研究现状与展望[J]. 环境科学进展, 1998, 7(4): 330-331.
ZHANG Nai-ming. The present situation and prospect of research on heavy metal pollution in soil-plant system[J]. *Advances in Environmental Science*, 1998, 7(4): 330-331.
- [15] 姚丽贤, 操君喜, 李国良, 等. 连续施用养殖场鸡、鸽粪对土壤养分和重金属含量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 819-825.
YAO Li-xian, CAO Jun-xi, LI Guo-liang, et al. Effect of continuous application of chicken and pigeon manure from poultry farms on concentrations of soil nutrients and heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 819-825.
- [16] 张青, 李菊梅, 徐明岗, 等. 改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 861-865.
ZHANG Qing, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 861-865.
- [17] GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S].
GB 15618—1995 Environmental quality standards for soil[S].
- [18] 顾继光, 周启星. 镉污染土壤的治理及植物修复 [J]. 生态科学, 2002, 21(4): 352-356.
GU Ji-guang, ZHOU Qi-xing. Cleaning up through phytoremediation: a review of Cd contaminated soils[J]. *Ecologic Science*, 2002, 21(4): 352-356.
- [19] Pukpian P, Sirisukhodom S, Carbinell-Barrachina A. Heavy metals and nutrients in sewage sludge amended Thai soils[J]. *Environ Sci Health*, 1998, 33(4): 573-597.
- [20] 华璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉、锌形态和小麦生长的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 346-350.
HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn on Cd, Zn formation in soil and wheat growth [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4): 346-350.
- [21] Chang C, Ent Z T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in Southern Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 145-153.
- [22] 高明, 车福才, 魏朝富, 等. 长期施有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 11-17.
GAO Ming, CHE Fu-cai, WEI Chao-fu, et al. Effect of long-term application of manures on forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 11-17.
- [23] 陈同斌, 陈志军. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 3(2): 183-186.
CHEN Tong-bin, CHEN Zhi-jun. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 183-186.