

长期不同施肥下我国 3 种典型土壤重金属的累积特征

徐明岗, 武海雯, 刘 景

(农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:采用现场采样及室内分析测试方法,观测了 1989 年开始的红壤、黑土和灰漠土 17 a 不同施肥(不施肥、施用化肥、化肥与有机肥配施和单施有机肥)下重金属元素 Cu、Cd、Zn、Pb 和 Cr 含量随时间序列的变化,阐明长期施肥下 3 种土壤中重金属元素的累积变化过程和富集特征。结果表明,灰漠土各处理的重金属含量在 17 a 间持平;红壤和黑土中 Zn、Pb 和 Cr 含量 17 a 间没有显著变化,各个处理间也没有显著差异,但施用有机肥处理的 Cu 和 Cd 含量则显著增加,其快速增加期起始于试验开始的 5~6 a 后。其中红壤 Cu 含量在 1996 年之后的 3 a 中由 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右快速增加到 $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,之后在高浓度持平;Cd 含量则在最近的 10 a 中从 $0.20 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 直线上升到 $1.30 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。黑土 Cd 在 6 a 中快速增加了 2.4 倍和 1.4 倍,2000 年后在高浓度基本持平。红壤的 Cu 和 Cd、黑土的 Zn 和 Cd 之间存在极显著正相关关系,表明其可能来源一致。长期施用有机肥是红壤和黑土中重金属显著富集的重要原因,有机肥的质量对土壤重金属的累积起重要作用。

关键词:长期施肥;重金属累积特征;红壤;黑土;灰漠土

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2319-06

Evolution of Heavy Metal Contents of Three Soils Under Long-term Fertilizations

XU Ming-gang, WU Hai-wen, LIU Jing

(Key Lab of Crop Nutrient and Fertilization, Ministry of Agriculture of China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Contents of Cu, Zn, Pb, Cr and Cd were periodically measured during 1989—2006 under different fertilizations in the Red Soil, Black Soil and Grey Desert Soil. In general, all heavy metals showed little change during 17 years of experiment for all the treatments in the Grey Desert Soil. For the Red Soil and Black Soil, Zn, Pb and Cr contents showed little change under all the treatments, whereas Cu and Cd contents revealed a significant increase under manure treatments. For Red Soil, Cu content increased from $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ after 6 years of manure treatments and was $55 \sim 65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ during the last ~ 7 years under NPKM and M treatments, but $27 \sim 47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the other treatments. Cd contents linearly increased from about $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to the maximum $1.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the later 10 years under NPKM and M treatments, while the other treatments kept in $0.1 \sim 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In Black Soil, Cd content was $0.4 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ under NPKM and 1.5MPKM treatments during the last 6 years, much higher than the other treatments of $0.07 \sim 0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. During 17 years different fertilizations, manure could be the most important sources of heavy metals in Red Soil and Black Soil. The quality of manure conducted to the enrichment of heavy metals in soil.

Keywords: long-term fertilization; character of heavy metal enrichment; Red Soil; Black Soil; Grey Desert Soil

施肥是培肥地力、保证作物产量的重要农业措施,但是肥料在为作物提供所需的养分元素的同时,

也会向土壤中输入重金属等有害元素。国内已有很多研究报道长期施肥下土壤重金属元素的富集现象。对连续施肥 25 a 后非石灰性潮土重金属含量的分析发现,不同施肥处理的 Cu、Zn、Cd、Pb 都有不同程度的富集,其中有机肥处理下 Cu 的富集程度显著高于化肥处理,而其他 3 种重金属元素则是施用化学磷肥处理高于有机肥处理,尤其是 Cd 的富集程度最高^[1]。对天津长期定位施肥下的潮土研究表明,施肥是影响土壤重金属含量变化的重要原因之一,单施氮肥对土壤

收稿日期:2010-06-19

基金项目: 国家“十一五”重点科技支撑计划项目(2008BADA7B03; 2006BAD05B09); 国家基础性工作专项(2007FY220400); 国家“863”计划项目(2006AA10Z417); 国家质量监督检验检疫总局公益性行业科研专项:食用农产品产地土壤质量安全等级评价方法及重金属限量标准研究(200910201)

作者简介: 徐明岗(1961—),男,陕西人,博士,研究员,长期从事土壤肥力演变与污染土壤修复研究。E-mail:mgxu@caas.ac.cn

重金属影响不大,施用磷肥则增加土壤中重金属含量,而施用以垃圾和禽畜排泄物为原料的有机肥则显著增加土壤中 Cu、Zn 和 Hg 的含量^[2]。陈芳等^[3]对长期不同施肥下封丘潮土的研究表明,随着施肥年限的增加,土壤中的 Cd、Pb 等重金属呈现逐年富集趋势,其中施用磷肥处理的 Cd 的富集率最高。对沈阳棕壤不同施肥处理 28 a 后 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 等 8 种重金属元素含量的分析发现,各施肥处理均有一定程度的积累富集,其中化肥处理的 Cd 积累最明显,高于有机肥处理,已超过国家土壤环境质量二级标准;而有机肥处理下 Pb 的累积率显著高于化肥处理;其他元素没有发生大量富集,各处理间也没有显著差异^[4]。湖南祁阳红壤长期施用猪粪后,土壤 Cu、Cd 含量显著升高,超过国家二级标准,已造成严重污染^[5]。朱凤莲^[6]在旱地红壤上的实验也证明耕层土壤中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 等重金属的浓度随着施猪粪量的增加而增加,连续施用猪粪对土壤耕层 Cu、Zn 的浓度有极显著影响。

大量研究表明,我国农田长期施用化学磷肥和有机肥明显增加了土壤表层的重金属含量,有的甚至已经形成污染,严重威胁土壤健康和食品安全;且不同地域农田土壤重金属元素的富集程度和来源也有很大差别^[1-6]。但目前对长期施肥下重金属的研究多集中在多年富集的结果上,对施用不同肥料下重金属的富集过程和累积特征研究还鲜见报道。

本文选取我国 3 种典型农田土壤为研究对象,通过对长期施肥下红壤、黑土和灰漠土中 Cu、Zn、Cd、Pb 和 Cr 5 种重金属元素全量的分析,探讨在长期施肥条件下,土壤重金属元素含量随时间的变化过程和趋势,研究不同施肥对土壤重金属含量的影响,为合理施肥,减少土壤污染提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验点基本情况

选取红壤、黑土和灰漠土作为研究对象,取自国家土壤肥力与肥料效益长期定位监测的 3 个实验站,分别位于中南部的湖南祁阳(111°52'32"E,26°45'12"

N)、东北的吉林公主岭(124°48'34"E,43°30'23"N)和西北的新疆乌鲁木齐(87°46'45"E,43°95'26"N)。这 3 个点的长期试验均开始于 1989 年,均设有 CK(对照,不施肥)、N(单施氮肥)、NP(氮磷肥配施)、NPK(氮磷钾肥配施)、M(单施有机肥)、NPKM(常量氮磷钾肥配施有机肥)和 1.5NPKM(增量氮磷钾配施增量有机肥)这 7 个施肥处理。各实验点的土壤类型、母质以及实验起始年的土壤养分含量和 pH 见表 1。

湖南祁阳的长期实验小区面积 196 m²,设两个重复。化肥用量为年施用纯 N 300 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻²;有机肥为养殖场的鲜猪粪,NPKM 和 1.5NPKM 处理年施用 42 t·hm⁻² 和 63 t·hm⁻²,M 处理年施用 60 t·hm⁻²。小麦-玉米轮作,一年两熟,玉米季施肥量占施肥总量的 70%。吉林公主岭长期实验为玉米连作,一年一熟。小区面积 400 m²,不设重复。施肥量分别为纯 N 165 kg·hm⁻²、P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻²、K₂O 82.5 kg·hm⁻²;有机肥为牛粪,NPKM 处理年施用量为 30 t·hm⁻²,1.5NPKM 为 45 t·hm⁻²。新疆乌鲁木齐的长期实验为小麦-小麦-玉米轮作,一年一熟。小区面积为 400 m²,不设重复。化肥按照 N:P₂O₅:K₂O=1:0.6:0.2 的比例进行施用;有机肥为羊粪,每年施用一次,年用量为 30 t·hm⁻² (NPKM) 和 45 t·hm⁻² (1.5NPKM),于当年作物收获后均匀撒施深耕。为避免漏水渗肥,3 个实验点的各小区之间均用 70~100 cm 深水泥埂隔开,地表露出 10 cm。公主岭和乌鲁木齐点根据需要,在干旱年份进行灌溉;湖南祁阳点整个作物生育期无灌溉。3 个实验点均采用常规耕作方式。

1.2 土样的采集与测定

各实验点每年秋季作物收获后,用土钻取耕层土壤(0~20 cm),每个处理随机取 6~10 个点,混合制样,样品风干后磨细,过 2 mm 和 0.25 mm 筛后保存。选取各长期实验站上述 7 个施肥处理 1989—2006 年的历史土样进行分析。根据土壤样品的保存情况,红壤每 3 a 取 1 次样品,共取 6 次,黑土和灰漠土每 5 a 或 6 a 取 1 次样品,共取 4 次。

所有土样均采用硝酸-氢氟酸消解、石墨炉原子

表 1 3 个长期实验点起始年的土壤基本性质

Table 1 Basic soil properties of the three long-term fertilization experiment stations in the start year

取样点	土壤	母质	有机质/ mg·kg ⁻¹	全氮/ mg·kg ⁻¹	全磷/ mg·kg ⁻¹	全钾/ mg·kg ⁻¹	有效氮/ mg·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	有效钾/ mg·kg ⁻¹	pH
湖南祁阳	红壤	第四季红土	17.7	1.05	0.7	13.7	14	1.6	145	5.7
吉林公主岭	黑土	第四季黄土状沉积物	28.16	1.04	0.49	16	118.5	11.99	70	7.1
新疆乌鲁木齐	灰漠土	黄土状洪积—冲积物	18.77	1.01	0.72	18	55.2	3.38	70	7.8

吸收火焰光度法测定 5 种重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 的含量。具体测定步骤为:称取过 0.25 mm 筛的土样 0.2~0.3 g, 放入消解罐, 加入 4 mL 氢氟酸和 5 mL 硝酸, 用微波消解仪消解。消解仪 10 min 内升温至 100 ℃, 消解 5 min 后, 再在 10 min 内升温至 180 ℃, 消解 10 min。土样消解完成后, 全部转移到聚四氟烧杯中, 在电热板赶酸至尽干, 用 5% 硝酸定容至 25 mL, 过滤, 滤液用 SP-3530A APC 型石墨炉原子吸收火焰计测定上述重金属元素含量。

1.3 数据分析

数据的统计分析与作图采用 Excel 2003 和 Origin 8.0 软件进行。土壤重金属含量随时间的变化趋势分析采用线性回归法, 回归方程达到 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 的显著或极显著水平时认为其上升或下降, 否则, 认为土壤重金属含量基本持平。

2 结果与分析

2.1 长期施肥下 3 种土壤全 Cu 含量的变化

长期施肥下, 红壤施用有机肥处理的 Cu 含量随施肥时间增加而快速增加, 显著高于纯化肥处理, 而黑土和灰漠土的各处理差别不大(图 1)。红壤中各处理 Cu 的起始含量相近, 在 $25 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。不施肥的 CK 在 16 a 中, Cu 含量基本持平。施用纯化肥的处理与 CK 没有显著差异。两施用有机肥处理(NPKM 和 M)在前 6 a 中变化不大; 其后的 3 a 间由 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右快速上升到 $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 年均增加约 $7.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他处理; 1999 年以后, 两个处理趋于持平; 截至 2006 年, 两处理都高于 $57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均已超过国家土壤环境质量二级标准($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 15618—1995)。此结果说明, 连续施用猪粪会造成红壤 Cu 的显著富集。黑土和灰漠土 Cu 含量起始值在 $25 \sim 29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 施肥 17 a, 处理间没有差异; 各处理的重金属含量与时间序列的线性回归方程没有达到显著水平, 说明重金属含量多年基本持平。

2.2 长期施肥下 3 种土壤 Zn、Pb、Cr 含量的变化

红壤中 Zn、Cr 较丰富, 含量高于黑土和灰漠土(表 2)。3 种土壤的 Zn、Pb 和 Cr 含量除个别处理外, 17 a 间基本持平, 其平均含量均未超过国家土壤环境质量二级标准。但是各处理年际间变异很大, 尤其是灰漠土。这可能是由于土壤本身的空间变异较大, 加上在 17 a 的施肥处理中某些年份实验点可能进行了某些调整所致。另外, 取样和测定过程中的方法选择也可能是导致变异偏大的原因之一。

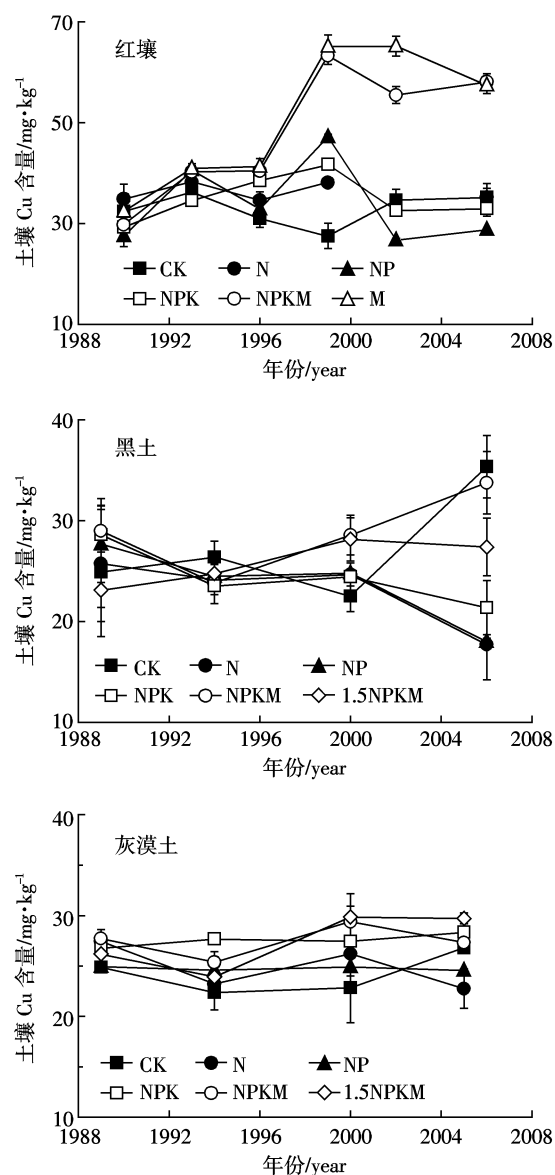


图 1 长期施肥下 3 种土壤各处理 Cu 含量随时间的变化
Figure 1 Evolutions of total Cu contents in three soils under long-term fertilization treatments

2.3 长期施肥下 3 种土壤 Cd 含量的变化

红壤和黑土中施用有机肥处理的 Cd 含量随时间的变化显著, 而灰漠土各处理则基本持平(图 2)。红壤各处理 Cd 含量的起始值为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。NPKM 和 M 两有机肥处理的 Cd 含量在前 6 a 中变化不大; 在此后的 10 a 中则由 $0.21 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 直线上升到 2006 年 $1.48 \sim 1.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($r_{\text{NPKM}} = 0.99^{**}$, $r_{\text{M}} = 0.99^{**}$, $n = 4$), 已超过国家土壤环境质量三级标准($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别增加了 6 倍和 3.4 倍, 增速超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。黑土同样也表现出施用有机肥处理的 Cd 含量呈阶梯式上升的过程: 施肥前 5 a 变化不大; 之

表 2 3 种土壤各处理 Zn、Pb 和 Cr 含量与时间序列的相关系数及多年平均含量
Table 2 Correlations between contents of total Zn, Pb and Cr and years and the average contents in 17 years

类型	处理	Zn		Pb		Cr	
		含量与时间的 相关系数 r	多年平均含量 ($\pm$ SD)/mg·kg ⁻¹	含量与时间的 相关系数 r	多年平均含量 ($\pm$ SD)/mg·kg ⁻¹	含量与时间的 相关系数 r	多年平均含量 ($\pm$ SD)/mg·kg ⁻¹
红壤	CK	0.38	111.2±17.2	0.56	40.8±4.2	0.41	108.±11.4
	N	0.40	108.2±19.0	0.44	47.7±8.32	0.20	111.±13.6
	PK	0.17	112.0±17.1	0.29	42.7±4.32	0.15	112.±10.1
	NPK	0.21	118.8±14.0	0.1	37.2±7.6	0.78*	116.6±7.9
	NPKM	0.35	123.9±17.9	0.46	40.4±4.5	0.47	110.3±7.8
	M	0.58	125.2±18.9	0.06	55.6±5.1	0.75	112.0±5.2
黑土	CK	0.02	58.4±8.7	0.09	30.5±11.2	0.16	52.5±4.9
	N	0.37	42.1±7.2	0.95*	29.8±9.0	0.26	39.2±5.9
	NP	0.57	60.2±10.5	0.35	29.7±5.5	0.82	45.4±7.8
	NPK	0.01	49.2±11.6	0.36	34.3±7.4	0.12	44.5±9.9
	NPKM	0.62	61.1±19.1	0.08	38.0±4.0	0.59	50.9±12.3
	1.5NPKM	0.78	61.6±22.3	0.71	36.4±2.4	0.4	56.0±17.4
灰漠土	CK	0.18	60.8±27.8	0.02	17.8±8.6	0.79	67.7±7.1
	N	0.14	38.4±18.6	0.55	16.1±5.0	0.22	71.1±8.8
	NP	0.02	62.3±32.3	0.07	22.5±4.1	0.98**	73.2±7.2
	NPK	0.49	75.2±30.7	0.68	18.3±8.8	0.21	73.4±7.3
	NPKM	0.00	71.7±33.8	0.3	18.0±8.9	0.56	72.8±7.0
	1.5NPKM	0.12	60.4±31.7	0.45	22.4±7.2	0.13	67.3±7.2

注:** 代表达到极显著水平 ($P<0.01$), * 代表达到显著水平 ($P<0.05$)。红壤 $n=6$, 黑土和灰漠土 $n=4$ 。

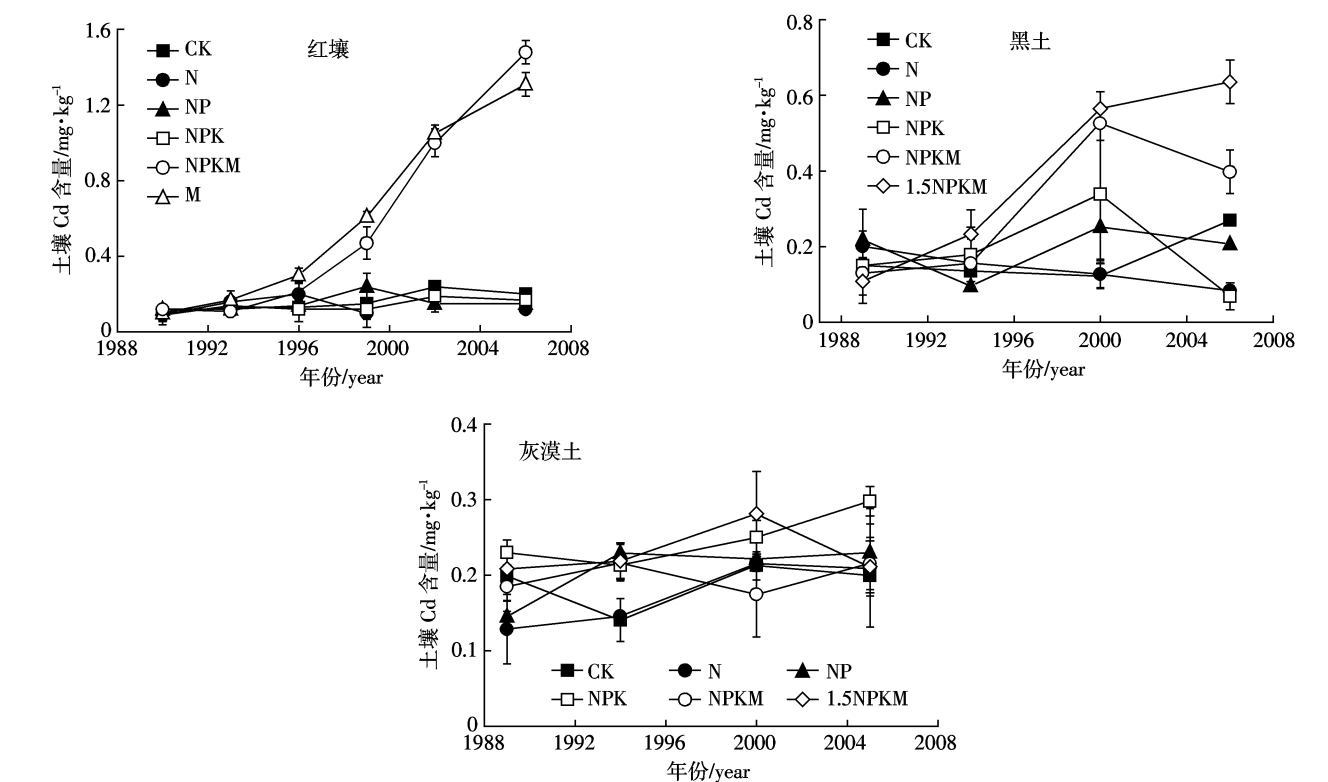


图 2 长期施肥下 3 种土壤各处理 Cd 含量随时间的变化
Figure 2 Evolutions of total Cd contents of three soils under long-term fertilization treatments

后的6a中,NPKM和1.5NPKM处理的Cd含量分别由 $0.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 快速上升到超过 $0.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,增速超过 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;在2000年以后,两处理为持平趋势;截至2006年,NPKM和1.5NPKM处理的Cd含量分别为 $0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过国家土壤环境质量二级标准($0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,GB 15618—1995)。两种土壤的CK处理在17a中基本持平,纯化肥处理与CK都没有显著差异。这一现象说明,红壤和黑土上长期施用有机肥会显著增加土壤的Cd含量。灰漠土起始含量与黑土相近,为 $0.15\sim 0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,施肥17a间各处理持平,处理间没有显著差异,截至2006年,各处理含量在 $0.21\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

2.4 重金属元素间的相关性

各金属元素之间的相关性,在一定程度上可以反映这些元素污染程度的相似性或来源的相似性^[7-8]。对各土壤5种重金属元素之间的相关性进行分析,结果显示:红壤中的Cu和Cd($r=0.80^{**}$, $n=25$),Pb和Cr($r=0.49^{**}$, $n=25$);黑土中的Zn和Cd($r=0.49^{**}$, $n=25$),Cr($r=0.52^{**}$, $n=25$);灰漠土中Zn和Pb($r=0.43^{**}$, $n=25$)均呈极显著正相关($P<0.01$)。这说明,红壤中的Cu和Cd,黑土中的Zn和Cd来源一致,结合前面对含量变化的分析,红壤和黑土中施用有机肥处理Cu和Cd随时间显著增加,说明有机肥很可能是土壤中Cu和Cd的重要来源。

3 讨论

本研究结果表明,长期施用有机肥,红壤和黑土中Cu和Cd出现了明显的富集现象,且已造成严重污染,而灰漠土中则没有明显的重金属累积。造成这一现象可能的主要原因是不同种类的有机肥向土壤中输入的重金属量不同。

红壤、黑土和灰漠土初始的Cu、Cd含量相差不大(图1和图2),但是多年施用不同种类的有机肥后,红壤中Cu和Cd的含量及增速显著高于黑土和灰漠土。红壤施用的是来自养殖场的鲜猪粪,黑土施用的是牛粪,而灰漠土施用的是羊粪。据研究^[7-9]猪粪重金属含量明显高于牛粪和羊粪,且与20世纪90年代初相比,猪粪中各种重金属含量的增加量高于牛粪,而羊粪中重金属含量则变化不大。本研究中施用猪粪的红壤重金属含量增幅最大,而施用羊粪的灰漠土则变化最小,黑土居中,这种变化趋势与有机肥重金属含量的研究相吻合。

研究表明,某些地区农田Cu、Zn和Cd污染与施用猪粪肥有密切的关系^[1,2,6,10-11],全国各地都有规模化养殖场的猪粪中Cu、Zn和Cd含量过高以致土壤中的富集和超标的报道。如董占荣等^[12]对杭州市规模化养殖场的研究表明,猪粪中Cu、Zn的平均含量都超过了 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd平均含量为 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,估计年均向土壤的输入Cu、Zn浓度超过 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,输入Cd浓度超过 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。张树清等^[13]研究了北京、浙江萧山、江苏南京、山东济南、吉林四平、山西杨凌及宁夏吴忠7个地区规模化养殖场猪粪中重金属的含量,发现Cu、Zn的平均含量在 $250\sim 3\,200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。韩晓凯等^[10]对吉林黑土长期定位实验的研究发现,其施用的猪粪肥中Cu含量高达 $867.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd为 $0.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,多年连续施用后,土壤表层Cu、Cd累积,明显高于纯化肥处理。朱亦君等^[14]对辽宁和吉林黑土施用猪粪的调查表明,其平均含Cu浓度约 $800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每加入30g猪粪,可以带入土壤中 $24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cu,土壤全Cu浓度增加 $18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。朱凤莲^[6]对旱地红壤连续施用猪粪的研究表明,耕层土壤Cu、Zn、Pb、Cd浓度与猪粪累计施用量呈极显著正相关关系。本研究中,红壤有机肥处理的Cu和Cd含量显著增加,且相关系数分析也显示红壤的Cu和Cd来源一致,这进一步说明红壤大量富集的Cu和Cd可能主要来源于施用的猪粪,这与朱凤莲^[6]、李本银等^[11]的研究结果一致。

由于历史有机肥样品未保存,无法对有机肥中的重金属进行分析和溯源,本文不能给出各年份有机肥各种重金属的确切含量,不能直接地证明有机肥就是土壤重金属含量增加的主要来源。但是对已有的数据和相关文献分析表明,长期施用有机肥,尤其是猪粪确实会造成土壤中某些重金属含量显著增加,尤其是Cu和Cd,甚至造成严重的土壤污染。同时也应该看到,红壤和黑土中施用有机肥处理之间,即红壤的NPKM和M之间以及黑土的NPKM和1.5NPKM之间,Cu和Cd含量没有显著的差异。鉴于处理间有机肥的使用量相差较大,说明重金属的输入量并不是唯一的限定因素。

化肥中的重金属元素主要来源于矿物原料及化工原料,尤其是磷肥中,重金属的种类和含量远高于氮肥和钾肥^[15]。虽然我国磷肥中重金属含量远低于世界主要国家^[16],但长期施用某些磷肥也会造成土壤Cd、Hg等污染^[1-4,10]。本研究中,3种土壤施磷肥处理虽然都还没有表现明显的重金属增加现象,但也应注意

其施用的潜在风险。

4 结论

3种土壤上连续施肥17a,灰漠土重金属含量持平,施用纯化肥没有引起3种土壤重金属含量的显著变化。与不施肥和施用纯化肥相比,连续17a施用有机肥造成了红壤和黑土中Cu和Cd的显著富集,且红壤的增幅高于黑土,而对两种土壤中的Zn、Pb和Cr含量没有显著影响。长期施用有机肥是红壤和黑土中重金属尤其是Cu和Cd显著富集的重要原因,有机肥的质量对重金属的累积起重要作用。

本文只对长期施肥下3种土壤中5种重金属元素在土壤中的累积过程和富集特征做了一定的探讨,对累积过程变化的原因以及有机肥中的重金属对土壤重金属变化的贡献还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘树堂,赵永厚,孙玉林,等. 25年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 164-167.
LIU Shu-tang, ZHAO Yong-hou, SUN Yu-lin, et al. Effects of 25 years long-term located fertilization on status of heavy metals in non-calcareous fluoro-aquic soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 164-167.
- [2] 任顺荣,邵玉翠,高宝岩,等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 96-99.
REN Shun-rong, SHAO Yu-cui, GAO Bao-yan, et al. Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 96-99.
- [3] 陈芳,董元华,安琼,等. 长期肥料定位实验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤, 2005, 37(3): 308-311.
CHEN Fang, DONG Yuan-hua, An Qiong, et al. Variation of soil heavy metal contents in a long-term fertilization experiment[J]. *Soil*, 2005, 37(3): 308-311.
- [4] 王颖,韩晓日,孙杉杉,等. 长期定位施肥对棕壤重金属的影响及其环境质量评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(4): 442-446.
WANG Ying, HAN Xiao-ri, SUN Shan-shan, et al. Effects of long-term fertilization on the heavy metals in brown soil and environmental quality evaluation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(4): 442-446.
- [5] 刘景,吕家珑,徐明岗,等. 长期不同施肥对红壤Cu和Cd含量及活化率的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 914-919.
LIU Jing, LV Jia-long, XU Ming-gang, et al. Effect of long-term fertilization on content and activity index of Cu and Cd in red soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 914-919.
- [6] 朱凤连. 集约化养猪场粪便对红壤旱地重金属积累与环境风险评估研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2008.
ZHU Feng-lian. Study on the accumulation of heavy metals on red soil upland and environmental assessment from pig manure in intensive breeding farm[D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2008.
- [7] 任顺荣,邵玉翠,王正祥. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 216-218.
REN Shun-rong, SHAO Yu-cui, WANG Zheng-xiang. Analyze on heavy metals content of merchandise compost produced by animal wastes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl): 216-218.
- [8] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.
LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.
- [9] 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.
- [10] 韩晓凯,高月,娄翼来,等. 长期施肥对黑土中Cu、Cd含量及其剖面分布的影响[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 10-13.
HAN Xiao-kai, GAO Yue, LOU Yi-lai, et al. Effects of long-term fertilization on the contents of Cu, Cd and its vertical distribution in the black soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(3): 10-13.
- [11] 李本银,汪鹏,吴晓晨,等. 长期肥料实验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281-288.
LI Ben-yin, WANG Peng, WU Xiao-chen, et al. Effect of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soil and brown rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 281-288.
- [12] 董占荣,陈一定,林咸永,等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 35-39.
DONG zhan-rong, CHEN yi-ding, LIN xian-yong, et al. Investigation on the contents and fractionation of heavy metals in swine manures from intensive livestock farms in the suburb of Hangzhou[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1): 35-39.
- [13] 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.
- [14] 朱亦君,郑袁明,贺纪正,等. 猪粪中铜对东北黑土的污染风险评估[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2751-2756.
ZHU Yi-jun, ZHENG Yuan-ming, HE Ji-zheng, et al. Risk assessment of pig manure Cu-contamination of black soil in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2751-2756.
- [15] 崔德杰,张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 366-370.
CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 366-370.
- [16] 鲁如坤,时正元,雄礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150-157.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, XIONG Li-ming. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of china and their effects on ecological environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2): 150-157.