

长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 含量及活化率的影响

刘景^{1,2}, 吕家珑¹, 徐明岗^{2*}, 张文菊², 陈苗苗²

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 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: 对始于 1990 年的红壤旱地施肥长期定位试验的 6 个处理包括对照(不施肥, CK)、施氮(N)、氮磷(NP)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾+有机肥(NPKM)和有机肥(M)的历年耕层土壤重金属 Cu 和 Cd 全量和有效态含量进行分析, 以阐明长期不同施肥条件下红壤 Cu、Cd 含量及活化率变化特征。结果表明, 16 a 连续不施肥或施用化肥(N/NP/NPK)条件下土壤 Cu、Cd 全量和有效态含量基本保持不变; Cu 活化率随施肥时间变化不显著, 但 Cd 的活化率在施肥后期(1996—2006)呈明显上升趋势, 在施氮处理上高达 95.7%; 不施肥和配施化肥下 Cd 的活化率与土壤 pH 值呈极显著负相关。化肥配施有机肥(NPKM)和单施有机肥处理(M)的土壤中 Cu、Cd 全量和有效态含量及其活化率随时间均呈显著上升趋势; 土壤 Cd 含量从 1990 年的 0.12 mg·kg⁻¹ 上升为 2006 年的 1.31~1.48 mg·kg⁻¹, 平均年上升 0.08~0.09 mg·kg⁻¹; 土壤有效态 Cd 含量 2006 年达到 0.53~0.58 mg·kg⁻¹, 为 1990 年的 18.0~19.9 倍; Cd 活化率与土壤有机质含量呈显著正相关。长期施用有机肥红壤 Cu、Cd 含量超标严重, 土壤 Cu 和 Cd 全量之间达极显著相关 ($r=0.887^{**}$, $n=30$), 其来源具有一致性, 有机肥为环境带来的风险应予以重视。

关键词: 红壤; Cu; Cd; 长期施肥; 活化率

中图分类号: X131.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 03-0914-06

红壤是中亚热带地区具有富铝化特征的地带性土壤, 是我国农产品的重要生产基地。目前, 其重金属污染较为严重, 有 68% 的重金属采样点发生污染^[1]。从施肥角度来看, 施用化肥和有机肥料可能导致重金属进入土壤, 在土壤中的富集将会阻碍作物生长和降低农产品质量, 给农业生产带来安全隐患^[2]。我国对土壤养分演变规律和产量变化研究较多, 从土壤环境质量出发, 对红壤区重金属累积特征的研究相对较少。虽陈芳等^[2]学者研究指出长期施肥会使土壤 Cd 含量升高, 任顺荣^[3]等也指出长期配施有机肥也会导致土壤有效 Cu 含量的增高, 也有研究表明长期施化肥对红壤 Cu 和 Cd 全量、有效态含量及活化率的影响均较小, 而有机肥处理明显提高了土壤 Cu 和 Cd 的全量、有效态含量及活化率, 土壤 Cu 和 Cd 全量分别比对照增加了 18.7% 和 8.3%, 有效态含量分别比对照增加了 65.8% 和 41.4%, 活化率分别比对照增加了 32.0% 和 29.8%^[4], 但施肥导致重金属累积的研究普遍存在着试验时间短, 跟踪不够, 对重金属累积过程和速率及其活化率变化的影响因素研究尚很少等问题^[2-5]。红壤肥料长期定位试验是研究长期施用不同肥料及其相互配合对作物产量、土壤肥力和生态环境影响的可靠方法。本文对 16 a 红壤定位试验不同施肥下耕层

土壤 Cu、Cd 含量及活化率的时间变化特征进行分析, 为合理施肥和保护土壤环境提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验设在湖南省祁阳县中国农业科学院红壤实验站内。试验地土壤为旱地红壤, 成土母质为第四纪红土。经过 1988—1990 年匀地后开始长期定位试验, 试验起始(1990 年)和 16 a 后(2006 年)的耕层(0~20 cm)土壤基本化学性质见表 1。

选择其中的 6 个处理进行重金属含量变化分析: (1) 对照(CK), 不施肥; (2) 氮(N); (3) 氮磷(NP); (4) 氮磷钾(NPK); (5) 氮磷钾+有机肥(NPKM); (6) 有机肥(M)。试验小区面积为 196 m², 2 次重复, 化学肥料用量为年施用 N 300 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻², 有机肥料来源于附近养殖场的鲜猪粪, 平均含水量 76.3%, 平均含氮 16.7 g/kg, NPKM 处理年施用 41 700 kg·hm⁻², M 处理年施用 60 000 kg·hm⁻², 所有施氮小区为等氮量施入。采取夏玉米/冬小麦轮作制, 一年两熟; 玉米期肥料施用量占全年施肥量的 70%, 小麦期占施用量的 30%; 有机肥在小麦播种前作基肥一次性施入。土壤样品在玉米收获后 9—10 月按之字形布点采集 0~20 cm 土壤 10 个点混合

基金项目: 国家“十一五”重点科技支撑计划基金项目(2008BADA7B03; 2006BAD05B09); 基础性工作专项基金项目(2007FY220400); 国家“863”计划基金项目(2006AA10Z417)

作者简介: 刘景(1983 年生), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤环境与食品安全方面的研究。E-mail: liujinggirl@126.com

*通讯作者: 徐明岗(1961 年生), 男, 研究员, 博士, 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

收稿日期: 2009-03-11

表 1 试验开始（1990 年）和施肥 16 a（2006 年）红壤的基本化学性质
Table 1 Basic chemical properties of red soil at beginning in 1990 and in 2006 after 16 year fertilization

年份	处理	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	w(全氮)/(g·kg ⁻¹)	w(全磷)/(g·kg ⁻¹)	w(碱解氮)/(mg·kg ⁻¹)	w(速效磷)/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾)/(mg·kg ⁻¹)	pH
1990 年		11.5	1.07	1.03	79.0	10.8	122	5.70
2006 年	CK	13.0	0.74	0.42	42.7	10.8	53.4	5.56
	N	13.4	0.69	0.46	91.4	6.50	48.5	3.94
	NP	15.5	0.71	0.85	66.2	67.9	50.9	4.40
	NPK	16.5	1.00	0.86	68.6	62.4	162	4.33
	NPKM	25.0	1.06	0.94	97.0	245	339	5.83
	M	23.0	1.00	1.23	92.4	180	132	6.58

成一个样，室内风干，磨细过 2 mm 和 0.25 mm 筛备用；籽粒样品在收获前分区采取，烘干并过 0.5 mm 筛备用。

1.2 测定项目及分析方法

根据所保存的历史样本情况，每 3~5 年取 1 个（次）样品进行分析，即分别取 1990 年、1995 年、1999 年、2002 年、2006 年的土壤样品测定重金属含量，土壤 Cu、Cd 全量的测定用硝酸、氢氟酸在 CEM-3051 型微波消解仪中消解，有效态 Cu、Cd 含量用盐酸（0.1 mol·L⁻¹，水土比 5：1）浸提；SP-3530APC 型石墨炉原子吸收火焰测定 Cu、Cd。数据采用 Excel 和 SPSS11.1 软件进行分析。

采用如下公式计算 Cu 和 Cd 的活化率^[6]：

活化率=（HCI 可提取的有效态重金属浓度/全量重金属浓度）×100%。

采用元素活化率能够避免在使用绝对量对不同土壤和元素状态进行比较时出现的背景干扰等问题。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 全量的影响

Cu 是植物生长必需的微量元素，缺少时植物会出现缺素症，但当土壤中含量超过一定限度时，也会影响作物的正常生长和品质^[7-8]。土壤全量 Cu 在不同施肥 16 a 后 CK 或施化肥处理（N/NP/NPK）增加仅为 1.0~3.5 mg·kg⁻¹（表 2）；而配施和单施有机肥处理分别由试验起始的 29.8 mg·kg⁻¹ 和 32.42 mg·kg⁻¹ 增加到 2006 年的 58.1 mg·kg⁻¹ 和 57.5 mg·kg⁻¹，呈极显著

线性增加趋势（ $R_{\text{NPKM}}^2=0.840^*$ ， $R_M^2=0.797^*$ ， $n=5$ ），年平均上升 1.92 mg·kg⁻¹ 和 1.95 mg·kg⁻¹。目前，这两个施肥处理的土壤铜和镉含量都超过国家土壤环境质量二级标准。

试验起始年份 1990 年的土壤全 Cd 含量为 0.09~0.14 mg·kg⁻¹，平均含量为 0.12 mg·kg⁻¹（表 2）。施肥 16 a 后，不施肥（CK）或施化肥处理（N/NP/NPK）土壤 Cd 含量增加范围仅为 0.02~0.04 mg·kg⁻¹，线性回归方程显著性检验结果没有达到显著相关，且未达污染（国家环境质量二级标准为 0.30 mg·kg⁻¹）。这与王红旗等^[9]研究的结果，施用国产的磷矿粉和磷肥，由于其 Cd 的含量低，不大可能造成土壤 Cd 的明显累积的结论相一致。配施和单施有机肥的土壤 Cd 含量随时间呈线性上升趋势（ $R_{\text{NPKM}}^2=0.931^{**}$ ， $R_M^2=0.968^{**}$ ， $n=5$ ），年平均上升 0.09 和 0.08 mg·kg⁻¹。在 2006 年的土壤 Cd 含量分别为 1.48 mg·kg⁻¹ 和 1.31 mg·kg⁻¹，比起始年增长了 12.2 倍和 13.1 倍，已经超过国家土壤环境质量三级污染标准（1.0 mg·kg⁻¹）。

分析重金属元素间的相关性，可以说明其来源是否具有 consistency。本研究中的土壤全 Cu 和全 Cd 的线性相关系数 R 为 0.887^{**}（ $n=30$ ），达极显著相关，说明其来源一致，可能来源于有机肥。有报道称有机肥中存在重金属风险^[3]，且高浓度的肥料重金属含量将会增加环境风险^[10]。这种风险的来源是由于饲料中的重金属含量偏高导致的^[11]。研究也表明有机肥（养殖场猪粪）中重金属含量超标严重，

表 2 长期不同施肥下红壤 Cu 和 Cd 全量含量
Table 2 Changes of soil total Cu and Cd contents under different fertilizer treatment

处理	w(Cu)/(mg·kg ⁻¹)		Cu 平均变化速率 /(mg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)	$r(n=5)$	w(Cd)/(mg·kg ⁻¹)		Cd 平均变化速率 /(mg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)	$r(n=5)$
	1990 年	2006 年			1990 年	2006 年		
CK	32.42	35.2	/	0.109	0.14	0.18	/	0.470
N	34.88	35.3	/	0.042	0.09	0.12	/	0.026
NP	27.54	28.8	/	0.160	0.12	0.15	/	0.402
NPK	29.29	33.0	/	0.161	0.12	0.14	/	0.361
NPKM	29.79	58.1	1.92	0.840*	0.12	1.48	0.09	0.931**
M	32.42	57.5	1.95	0.797*	0.10	1.31	0.08	0.968**

注：r 代表线性相关系数，*代表显著性检验结果（*5%水平下显著，**1%水平下显著）

威胁到食品安全和环境质量^[12]。

试验点2006年各肥料中化学肥料Cu和Cd含量都较低(表3), 所以不施肥或施化肥处理土壤未有Cu和Cd累积。有机肥中Cu含量严重超标, 达144 mg·kg⁻¹, 这与单施或配施有机肥处理的土壤全量Cu明显累积的结果相一致。根据国家饲料卫生标准^[12], 我国将铜作为允许含有的重金属元素一直未做最高限量规定, 所以猪粪中铜含量较高。2006年有机肥中Cd含量相对较低, 为0.25 mg·kg⁻¹, 但单施或配施有机肥处理的土壤全Cd累积明显, 原因可能是由于以前的有机肥中含Cd较高所致, 因为我国对有毒元素Cd的猪饲料允许含量只是在前几年才有明显的限量规定(规定在0.5 mg·kg⁻¹以下), 所以2006年有机肥中Cd含量较低, 并不能说明以前的有机肥中Cd含量情况。根据土壤Cd在单施或配施有机肥的处理的累积情况, 可以推断以前施入土壤的有机肥中应含有较高的Cd, 但由于历史的有机肥样品未保存, 所以本文无法对历史样品进行分析和溯源, 从而不能给出确切和直接的以前有机肥Cd含量的证据。关于这一问题, 尚需要在今后的工作中进一步研究。

2.2 长期不同施肥对红壤有效态 Cu、Cd 含量的影响

施肥 16 a 红壤有效 Cu 在不施肥或施化肥下含量为 5.00 mg·kg⁻¹ 以下, 含量变化不大(图 1)。配施和单施有机肥的土壤有效 Cu 含量分别由起始年的 2.64 mg·kg⁻¹ 和 2.65 mg·kg⁻¹ 上升到 2006 年的 21.8 mg·kg⁻¹ 和 23.5 mg·kg⁻¹, 增加了 7.3 和 7.9 倍, 呈极显著线性上升趋势 ($R_1^2=0.943^{**}$, $R_2^2=0.971^{**}$, $n=5$)。这和王姝等人的研究结果类似, 他们的研究也表明施用有机肥的土壤有效 Cu 含量随施肥年限增加而增加^[4,13]。

红壤有效 Cd 含量变化见图 2。不施肥或施化肥前 5 年, 土壤有效 Cd 含量变化不大, 均在 0.20 mg·kg⁻¹ 以下, 从 1995 年起, 含量有所上升, 到 2006 年增长了 0.08~0.10 mg·kg⁻¹, 变化很小。配施和单施有机肥的土壤有效 Cd 含量从试验起始的 0.03 mg·kg⁻¹ 分别上升到 2006 年的 0.53 mg·kg⁻¹ 和 0.58 mg·kg⁻¹, 增加了 17.0 和 18.9 倍, 呈极显著的线性

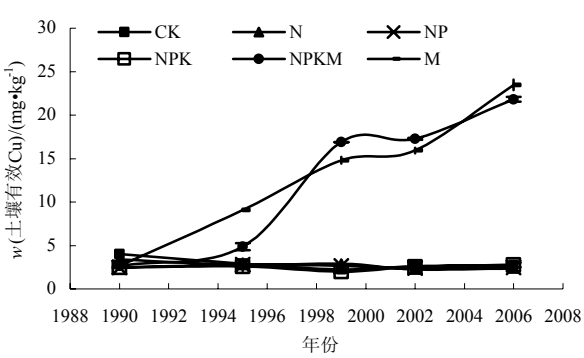


图 1 长期不同施肥处理下土壤有效铜 Cu 含量变化
Fig. 1 Changes of soil extractable Cu contents under different fertilizer treatment

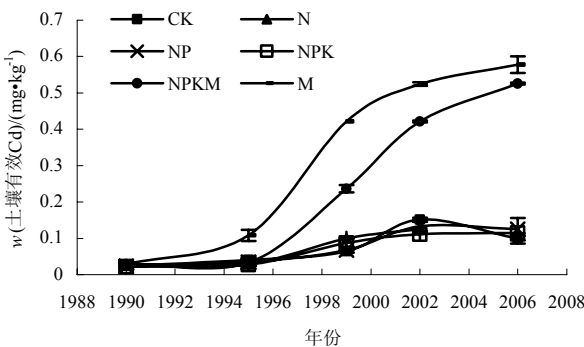


图 2 长期不同施肥下土壤有效 Cd 含量变化
Fig. 2 Changes of soil extractable Cd contents under different fertilizer treatment

上升趋势 ($R_{NPKM}^2=0.883^{**}$, $R_M^2=0.952^{**}$, $n=5$), 年平均速率分别为 0.03 mg·kg⁻¹ 和 0.04 mg·kg⁻¹, 且施用有机肥 16 a 后, 土壤有效 Cd 含量一直高于 NPKM 处理。

2.3 长期不同施肥下红壤 Cu 和 Cd 活化率变化及其原因分析

2.3.1 长期不同施肥红壤 Cu 和 Cd 活化率变化特征

经过 16 a 耕作施肥, 不施肥或施化肥处理活化率的土壤 Cu 的活化率都在 10.0% 以下 (图 3)。配施和单施有机肥的土壤铜活化率呈显著的线性上升趋势 ($R_{NPKM}^2=0.915^{**}$, $R_M^2=0.898^{**}$, $n=5$), 年平均上升 1.95% 和 1.82%, 2006 年分别达到 37.5% 和 40.9%, 高出起始年 5 倍左右。

表 3 施用肥料中 Cu、Cd 含量
Table 3 The content of the total Cu and Cd in fertilizers

肥料 (种类)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)	肥料 (种类)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
氮肥 (尿素)	0.45	ND	钾肥 (氯化钾)	0.11	0.05
磷肥 (过磷酸钙)	2.85	0.06	有机肥 (农家猪粪)	140	0.25

注: “ND”为低于仪器检出限

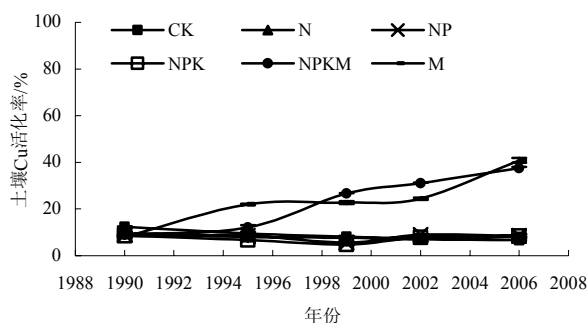


图3 长期施肥下红壤 Cu 活化率

Fig. 3 Changes of soil activity index Cu under different fertilizer treatment

不同施肥下土壤 Cd 的活化率均从 1996 年起呈上升趋势 (图 4)。2006 年氮处理活化率为 95.7%，处于极高水平。配施和单施有机肥处理施肥 16 a 后活化率和起始年相比分别增加了 10.4% 和 15.4%。

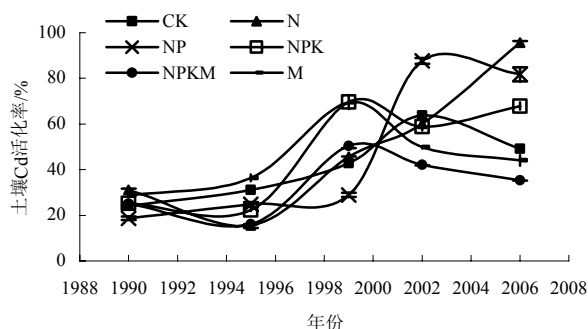


图4 长期施肥下红壤 Cd 活化率

Fig. 4 Changes of soil activity index Cd under different fertilizer treatment

2.3.2 土壤 Cu 和 Cd 活化率影响因素分析

土壤 Cu 和 Cd 活化率与土壤性质，如：pH、有机质含量、全氮、全磷含量等，密切相关^[14-15]。本试验各处理土壤均为旱地红壤，粘粒含量变化不大；土壤本身养分缺乏，阳离子交换容量小^[16]，由于不施有机肥处理和施有机肥处理土壤有机质和 pH 值变化很大 (表 1)，所以，本文将不施肥和施化肥等处理归为一类，配施和单施有机肥处理分为一类，采用 SPSS 逐步回归法 (Stepwise 法) 研究活化率与土壤有机质 (X_1) 和 pH (X_2) 之间的关系。

结果表明，配施和单施有机肥下 Cu 的活化率与土壤有机质和 pH 关系都不显著。配施和单施有机肥下 Cd 活化率仅与有机质含量呈显著正相关，相关方程为 $Y = -8.35 + 2.49X_1$ ($P_1 = 0.049 < 0.05$)，这可能与外源 Cd 随有机肥带入后，一方面增加土壤有机质含量，另一方面进入土壤的外源 Cd 主要以交换态形式存在，导致有效性较高、活化率上升有关^[17]。单相关分析与有机质关系也验证了此结果 (图 5)。在不施肥或施化肥下，土壤 Cd 活化率则不仅

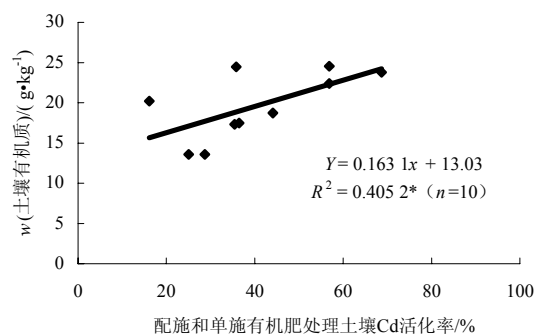


图5 配施和单施有机肥的土壤 Cd 活化率与土壤有机质关系

Fig. 5 The relationship between activity index of Cd and organic matter under NPKM and M fertilizer treatments in soil in soil

与有机质含量呈显著相关而且随 pH 而变化，其相关方程为 $Y = 265.49 - 4.82X_1 - 30.78X_2$ ($P_1 = 0.326 < 0.5$, $P_2 = 0.002 < 0.005$)。由此可知，土壤 pH 值也是影响 Cd 活化率的主要因素之一。将 pH 值与不施肥和施化肥下的 Cd 活化率单相关分析 (图 6)，也证明了这一点。因此，随化肥的施用红壤酸化加剧^[18-19]，土壤中 Cd 转化为有效态的部分将增加 (即活化率增加)，进一步恶化土壤环境质量^[15]。

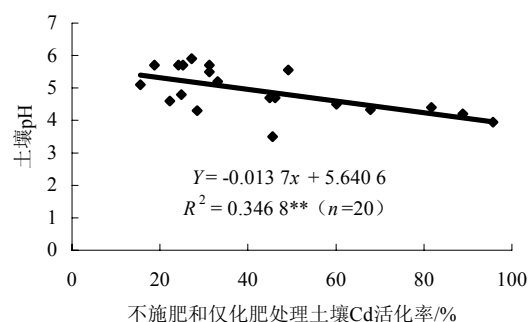


图6 不施肥和仅施化肥的土壤 Cd 活化率与土壤 pH 关系

Fig. 6 The relationship between activity index of Cd and pH under no fertilizer and chemical fertilizer treatments in soil

3 结论

长期不施肥或施化肥的红壤 Cu、Cd 全量和有效态含量基本保持不变，而配施或单施有机肥的红壤 Cu、Cd 全量和有效态含量均显著上升，Cd 全量 2006 年达 1.31~1.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，超过国家环境质量三级标准。土壤有效 Cd 平均含量从试验起始的 0.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别上升到 2006 年的 0.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.58 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，年平均增加分别为 0.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相关分析 Cu 和 Cd 来源具有一致性，有机肥可能是污染的主要来源，且污染已较为严重，应予以重视。

不施肥或施化肥的红壤中 Cu 活化率变化不显著；土壤 Cd 的活化率高于 Cu，且随时间呈显著上

升趋势。土壤 Cd 的活化率与土壤 pH 呈显著的负相关,在酸化严重的施用氮处理上活化率达 95.7%。配施或单施有机肥的土壤 Cu、Cd 的活化率随施肥年限呈显著的上升趋势,且 Cd 活化率与土壤有机质含量呈显著正相关。

本文仅分析了长期不同施肥下红壤 Cu、Cd 全量和有效态含量的时间序列变化特征,对其来源和有机肥施入量对土壤中 Cu、Cd 累积的影响等,尚需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 何园球,孙波.红壤质量演变与调控[M].北京:科学出版社,2008. He Yuanqiu, Sun Bo. Evolution and Regulation of Red Soil Quality[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 陈芳,董元华,安琼,等.长期肥料定位试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 Yuanhua, An Qiong, et al. Variation of soil heavy metal contents in a long-term fertilization experiment[J]. Soils, 2005, 37(3): 308-311.
- [3] 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 Kaifeng, Peng Na, Wang Kairong, 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.
- [4] 任顺荣,邵玉翠,高宝岩,等.长期定位施肥对土壤微量元素的影响[J].生态环境,2005,14(6):921-924. Ren Shunrong, Shao Yucui, Gao Baoyan, et al. Effects of long-term located fertilization on the microelement contents of soil[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(6): 921-924.
- [5] BULLUCK L R, BROSIUS M, EVANYLO G K, et al. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 19(2): 147-160.
- [6] 潘根兴,高建芹,刘世梁,等.活化率指示苏南土壤环境中重金属污染冲击初探[J].南京农业大学学报,1999,22(2):46-49. Pan Genxing, Gao Jianqin, Liu Shiliang, et al. Activity index as an indicator of environmental stress of heavy metal elements on soils in southern Jiangsu, China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1999, 22(2): 46-49.
- [7] 宗良纲,丁园.土壤重金属(CuZnCd)复合污染的研究现状[J].农业环境保护,2001,20(2):126-128. Zong Lianggang, Ding Yuan. Present investigation on synergism of heavy metals copper, zinc and cadmium in soil[J]. Journal of Agro-environment Science, 2001, 20(2): 126-128.
- [8] 王松华,杨志敏,徐朗来.植物铜素毒害及其抗性机制研究进展[J].生态环境,2003,12(3):336-341. Wang Songhua, Yang Zhimin, Xu Langlai. Mechanisms of copper toxicity and resistance of plants[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 336-341.
- [9] 王红旗,舒艳,王亚男.污水土地处理磷污染物迁移转化模拟讨论分析[J].城市环境与城市生态,2002,15(4):36-38. Wang Hongqi, Su Yan, Wang Yanan. Experimental analysis of simulate phosphorus transfer and transformation in wastewater land treatment system[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2002, 15(4): 36-38.
- [10] 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现状与分析[J].农业环境科学学报,2005,24(2):392-397. Liu Rongle, Li Shutian, Wang Xiubin, et al. Analysis of heavy metals contents in organic fertilizer and waste in China[J]. Water and Environment Journal, 2005, 24(2): 392-397.
- [11] 闫秋良,刘福柱.通过营养调控缓解畜禽生产对环境的污染[J].家禽生态,2002,23(3):68-70. Yan Qiuliang, Liu Fuzhu. Reduction environmental pollution of animal production by adjustment of nutrition[J]. Ecology of Domestic Animal, 2002, 23(3): 68-70.
- [12] 黄玉溢,刘斌,陈桂芬,等.规模化养殖场猪配合饲料和粪便中重金属含量研究[J].广西农业科学,2007,38(5):544-546. Wang Yuyi, Liu Bin, Chen Guifen, et al. Contents of heavy metals in formulated feed for pig and pig manure of scaled piggery[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2007, 38(5): 544-546.
- [13] 王姝.长期施肥对土壤生态环境和农产品安全质量的影响[D].沈阳农业大学,2003. Wang Shu. Effect of long-term fertilization on soil environmental quality and food safety in soil[D]. Shenyang Agricultural University, 2003.
- [14] 余国营,吴燕玉.土壤环境中重金属元素的相互作用及其对吸附特性的影响[J].环境化学,1997,16(1):30-36. Yu Guoying, Wu Yanyu. Effects of heavy metals joint action on their characteristic of sorption and desorption in brown soil[J]. Environmental Chemistry, 1997, 16(1): 30-36.
- [15] 万红友,周生路,赵其国,等.苏南经济快速发展区土壤有效态镉含量影响因素及分布特征[J].长江流域资源与环境,2006,15(2):213-218. Wan Hongyou, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo, et al. Characteristics in the distribution of available cadmium in soil with analysis of its influential factors in fast economy developing region of South Jiangsu province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(2): 213-218.
- [16] 徐明岗,梁国庆,张夫道,等.中国土壤肥力演变[M].北京:中国农业科学技术出版社,2006. Xu Minggang, Liang Guoqing, Zhang Fudao, et al. Evolution of Soil Fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 2006.
- [17] 曾清如,周细如,杨仁斌,等.不同来源重金属在土壤中的形态分布差异[J].农村生态环境,1994,10(3):48-51. Zeng Qingru, Zhou Xiru, Yang Renbin, et al. Fractionation of Pb, Zn and Cd in three polluted soils and their residues[J]. Rural Eco-Environment, 1994, 10(3): 48-51.
- [18] 王伯仁,徐明岗,文石林,等.长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):97-100. Wang Boren, Xu Minggang, Wen Shilin, et al. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 97-100.
- [19] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].生态环境,2004,13(4):656-660. Huang Guoqin, Wang Xingxiang, Qian Haiyan, et al. Negative impact of inorganic fertilizers application on agricultural environment and its countermeasures[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 656-660.

Effect of long-term fertilization on content and activity index of Cu and Cd in red soil

LIU Jing^{1,2}, LÜ Jialong¹, XU Minggang^{2*}, ZHANG Wenju², CHEN Miaomiao²

1. College of resource and environmental science, Northwest Agricultural and Forestry University Yanglin, Shanxi 712100, China;

2. 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: The changes of contents and availabilities of Cu and Cd were studied under a long-term experiment with six fertilization treatments (CK, N, NP, NPK, NPKM and M) in red soil and the variation characteristics of contents and activity index of Cu and Cd were discussed. The results indicated that the contents and availabilities of Cu and Cd were not changed under no fertilizer(CK) and chemical fertilizer (N, NP and NPK) treatments from 1990 to 2006. The activity index of Cu didn't change significantly with time. The activity index of Cd increased significantly in the last 10 years under no fertilizer and chemical fertilizer treatments. Moreover, the activity index of Cd was 95.7% in the N treatment in 2006. Activity index of Cd was negatively correlated to pH of soil ($P<0.005$) under no fertilizer and chemical fertilizer treatments. However, the contents and activities index of Cu and Cd in the manure treatments (NPKM and M) were increased significantly during 16 years. The contents of Cd changed from 0.10~0.12 mg·kg⁻¹ in 1990 to 1.31~1.48 mg·kg⁻¹ in 2006 and increased annually by 0.08~0.09 mg·kg⁻¹ in the manure treatments. During 16 years of fertilization, the contents of available Cd were 0.53~0.58 mg·kg⁻¹ in the manure treatments, being 18.0~19.9 times of the background value. Activity index of Cd was positively correlated to soil organic matter ($P<0.05$) in manure treatments. The study indicated that the correlation coefficient of Cu and Cd content was 0.887(superscript**) and significant at 1% level. Tong-term manure fertilization lead to high level of Cu and Cd in red soil, which exceeded the national standard of Cu and Cd in soil. The source of the Cu and Cd was from applied manure. Therefore, harm of manure to the environment should be considered seriously.

Key words: red soil; Cu; Cd; long-term fertilization; activity index