

长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响

王 美¹, 李书田^{1*}, 马义兵¹, 黄绍敏², 王伯仁³, 朱 平⁴

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 3.中国农业科学院衡阳红壤实验站, 湖南 祁阳 426182; 4.吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林 公主岭 136100)

摘要:分析测定黑土、潮土和红壤在20多年不同施肥措施(不施肥、单施化肥、化肥与有机肥配施)下土壤和作物中Cu、Zn、Cd的含量,结果表明:长期单施化肥对黑土、潮土、红壤Cu、Zn、Cd含量没有显著影响;在黑土和红壤上,有机肥与化肥配施与对照不施肥相比显著提高Cu、Zn和Cd含量;红壤上有机肥和化肥配施(NPKM和1.5NPKM)处理小麦籽粒和秸秆Cu、Zn、Cd含量显著高于单施化肥处理(NPK),而且化肥配施有机肥(NPKM)与单施化肥相比(NPK)显著提高玉米籽粒和秸秆Zn、Cd含量;在潮土上,NK处理显著提高小麦籽粒和秸秆中Zn含量;黑土上各处理玉米籽粒中Cd含量无显著差异,而化肥配施有机肥比单施化肥显著提高玉米籽粒Zn含量。根据测定数据估算,在目前施肥措施和作物种植体系下,黑土对Cu、Zn、Cd的最高承载年限分别为67年、118年、9年,潮土分别为1042年、2043年、631年,红壤分别为10年、46年、0.5年。假设土地承载年限为45年且有机肥施用量低于10 t·hm⁻²,黑土和潮土可接受有机肥中Cd的最高限量低于我国有机肥中的平均含量,说明实际生产中施用有机肥造成土壤Cd污染的风险较大。因此,有必要尽快制定有机肥中重金属的安全限量标准,以确保土壤和农产品安全。

关键词:长期施肥;重金属;土壤;玉米;小麦

中图分类号:X503 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)01-0063-12 doi:10.11654/jaes.2014.01.008

Effect of Long-term Fertilization on Heavy Metal Accumulation in Soils and Crops

WANG Mei¹, LI Shu-tian^{1*}, MA Yi-bing¹, HUANG Shao-min², WANG Bo-ren³, ZHU Ping⁴

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2.Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3.Hengyang Red Soil Experimental Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang 426182, China; 4.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136100, China)

Abstract: Contents of Cu, Zn and Cd in soil and plant samples collected from over 20 year's fertilization experiments in black soil, fluvo-aquic soil and red soil were analyzed. Results indicated that Cu, Zn and Cd contents in three soils were not affected by applying chemical fertilizers alone, but significantly increased by chemical fertilizers combined with manure(NPKM), compared with the control without fertilizer application in black and red soil. In red soil the concentrations of Cu, Zn and Cd in grain and straw of wheat were significantly increased in the treatments of NPKM and 1.5NPKM compared with the NPK treatment, and Zn and Cd in maize grain and straw were also higher in the treatment of NPKM than NPK. In fluvo-aquic soil the NK treatment significantly increased the contents of Zn in wheat grain and straw. In black soil there was no difference in the content of Cd in maize grain among treatments, while NPKM or 1.5NPKM treatment resulted in significantly higher Zn contents in maize grain than NPK treatment. Estimation based on the data showed that the maximum bearing year for Cu, Zn and Cd was 67, 118 and 9 years in black soil, 1042, 2043 and 631 years in fluvo-aquic soil, 10, 46 and 0.5 years in red soil, respectively. Under current fertilization and cropping systems, therefore, application of manures would have great environmental risks for both soils and plants. It is necessary to establish a national standard for limiting metal concentrations in manures.

Keywords: long-term fertilization; heavy metals; soil; maize; wheat

收稿日期:2013-05-29

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(200903015)

作者简介:王 美(1988—),女,山东青岛人,硕士研究生,主要从事肥料资源安全高效利用研究。E-mail:luckydogme@126.com

*通信作者:李书田 E-mail:lishutian@caas.cn

施肥在保证作物高产和提高作物品质方面起着不可替代的支撑作用^[1-5]。但是,随着作物产量的提高,施肥量不断增加,施肥与环境的关系越来越受到重视,尤其是施肥引起的土壤环境质量和农产品安全问题已引起广泛关注^[6-7]。化肥和有机肥中除含有作物必需的养分外,还含有一定量的有毒有害物质如重金属^[8-9]。虽然绝大多数肥料中重金属含量并不高,也没有超标,但重金属不易分解和损失,易在土壤中累积。长期施肥对土壤和农作物重金属累积是否有影响,影响的程度如何,土壤最高承载力是多少等还不十分清晰。目前,国内外针对肥料引起的土壤重金属污染研究大都通过盆栽或短期田间试验进行,存在试验时间短、跟踪不够等问题^[10-12]。因此,通过长期定位试验了解不同施肥措施下主要金属元素在土壤和作物系统的累积,指导安全高效施肥,才是解决问题的关键所在。长期定位试验是研究长期不同施肥制度对土壤肥力、作物产量和生态环境影响的可靠方法。本文以黑土、潮土、红壤上20多年的肥料长期定位试验为基础,研究长期不同施肥措施对重金属在土壤中累积和在农作物产品中富集的影响,预测当前种植体系和施肥措施下土壤最高承载年限,估算有机肥中重金属最高限量,以期为从作物种植源头阻控重金属在土壤中富集和保证农产品安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

选取3个国家土壤肥力与肥料效益长期定位监测试验点,分别位于东北吉林公主岭黑土试验站(124°48'34"E, 43°30'23"N)、河南郑州潮土试验站(113°39'25"E, 34°47'02"N)和湖南祁阳红壤试验站(111°52'32"E, 26°45'12"N)。公主岭黑土试验始于1989年,其余两个试验始于1990年。2012年在3个地点的长期定位试验点选取5个处理采集土壤和植物样品(其中,红壤NK处理由于长期不施磷肥,没有产量);CK(对照,不施肥)、NK(氮钾肥配施)、NPK(氮磷钾肥配施)、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)。各试验点的土壤基本理化性状和试验的基本情况见表1和表2。

1.2 样品采集与测定

2012年在各试验点每季作物收获期,采集耕层土壤(0~20 cm)样品,每个处理取3次重复,在相应的小区和处理采集植株样品,分籽粒和秸秆。土壤样品风干后,分别过2 mm和0.15 mm塑料筛,保存于广口瓶中备用。植株样品杀青后于65 °C烘箱中烘干,不锈钢粉碎机粉碎后保存备用。

表1 3个长期试验点的土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of soils in the three long-term experimental sites

项目			pH值	SOM/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
公主岭	土壤类型	黑土	1989年 ^[13]	7.6	23.3	1.40	11.8
	土壤质地	粘壤土		CK	8.1	24.1	0.93
	砂粒/%	38.3		NK	5.8	25.4	0.97
	粉粒/%	29.9		NPK	5.8	24.6	1.13
	黏粒/%	31.8		NPKM	7.5	43.7	1.76
				1.5NPKM	7.5	45.2	1.85
郑州	土壤类型	潮土	1990年 ^[13]	8.3	11.4	0.65	6.60
	土壤质地	粉砂壤土		CK	8.5	13.4	0.59
	砂粒/%	20.3		NK	8.5	13.6	0.64
	粉粒/%	65		NPK	8.5	14.9	0.68
	黏粒/%	14.7		NPKM	8.6	20.0	0.84
				1.5NPKM	8.4	21.1	0.90
祁阳	土壤类型	红壤	1990年 ^[13]	5.7	14.0	1.07	10.8
	土壤质地	粘土		CK	6.0	13.4	0.72
	砂粒/%	3.7		NK	3.8	14.5	0.86
	粉粒/%	34.9		NPK	4.3	17.7	0.82
	黏粒/%	61.4		NPKM	6.0	24.6	1.07
				1.5NPKM	6.2	28.0	1.58

表2 3个定位试验项目的详细信息

Table 2 Detailed information for the three long-term experiments

项目	吉林公主岭	河南郑州	湖南祁阳
种植制度	春玉米	小麦-玉米	小麦-玉米
作物品种	不固定	小麦:不固定,玉米:郑单8号	不固定
小区面积/m ²	400	400	198
化肥种类	尿素和二胺-三料-氯化钾	尿素-普钙-硫酸钾(2003年后为氯化钾)	尿素-过磷酸钙-氯化钾
化肥用量(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)/kg·hm ⁻²	165-82.5-82.5	352.5-176-176	300-120-120
有机肥种类	M为猪厩肥(2005年后换成牛粪)	牛厩肥或马厩肥,个别年份为土杂肥	鲜猪粪
有机肥用量/t·hm ⁻²	NPKM:115 1.5NPKM:172.5	NPKM:22.5 1.5NPKM:33.75	NPKM:42 1.5NPKM:63
施肥方法	厩肥于每年播种前一次性施入,氮肥1/3做底肥深施,2/3做追肥7月上旬施入,磷肥、钾肥全部做基肥播种时一次施入	磷肥和钾肥于小麦和玉米播种前一次性施入,氮肥分别在小麦返青期和玉米大喇叭口期按基追比例6:4施入;厩肥于小麦播种前做基肥	化肥于小麦和玉米播种前一次性施入,厩肥1年施用2次,于小麦和玉米播种前做基肥
水分管理	雨养	小麦播种前灌水每公顷750 m ³ 左右,若越冬期不灌水,返青期灌水追肥;抽穗期灌水,每公顷600 m ³ 。一般小麦灌2~3次;玉米犁地播种前,灌水每公顷750 m ³ 左右,播后一般不再灌水	无灌溉
农药使用	不使用除草剂和杀虫剂	不打药	在喇叭口期治玉米螟一次,施用呋喃丹45 kg·hm ⁻²

资料来源:马义兵和李秀英(2011)^[14]

1.3 测定方法

土壤基础理化性状测定参照《土壤农业化学分析方法》^[15]。土壤pH用酸度计法测定(水土比2.5:1),土壤有机质采用重铬酸钾法,土壤全N采用半微量凯氏定氮法,土壤速效磷用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH=8.5)浸提-钼锑抗比色法,土壤速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计法测定。

土壤重金属测定采用美国USEPA 3052方法^[16],此方法可加快样品分解速度,减少消解过程中样品的污染^[17],具有速度快、试剂用量少、节约能源等优点^[18]。用这种方法测定的结果对照我国土壤环境质量标准进行评价,更敏感,更能减少环境风险。称取过0.15 mm塑料筛的土样0.500 0 g,放入消解罐,加入9 mL硝酸和3 mL氢氟酸,过夜,用微波消解仪消解。消解完成后,全部转移到聚四氟乙烯烧杯中,在电热板160 °C下赶酸至近干,用5%硝酸定容至50 mL,过滤,滤液用Elan DRC-e型ICP-MS测定Cu、Zn和Cd含量。

植株样品用HNO₃-H₂O₂混合酸微波消解^[16]。称取植株样0.500 0 g,放入消解罐,加入9 mL硝酸,缓慢滴入3 mL双氧水,用微波消解仪消解。消解完成后,全部转移到玻璃烧杯中,在电热板160 °C下赶酸至近干,然后用5%硝酸定容至25 mL,过滤,滤液用Elan DRC-e型ICP-MS测定Cu、Zn、Cd元素的含量。

重金属分析过程用国家一级标准物质:土壤(GSS-7)、小麦(GSB-2)和玉米(GSB-3)对样品中痕量元素含量测定进行分析质量控制。

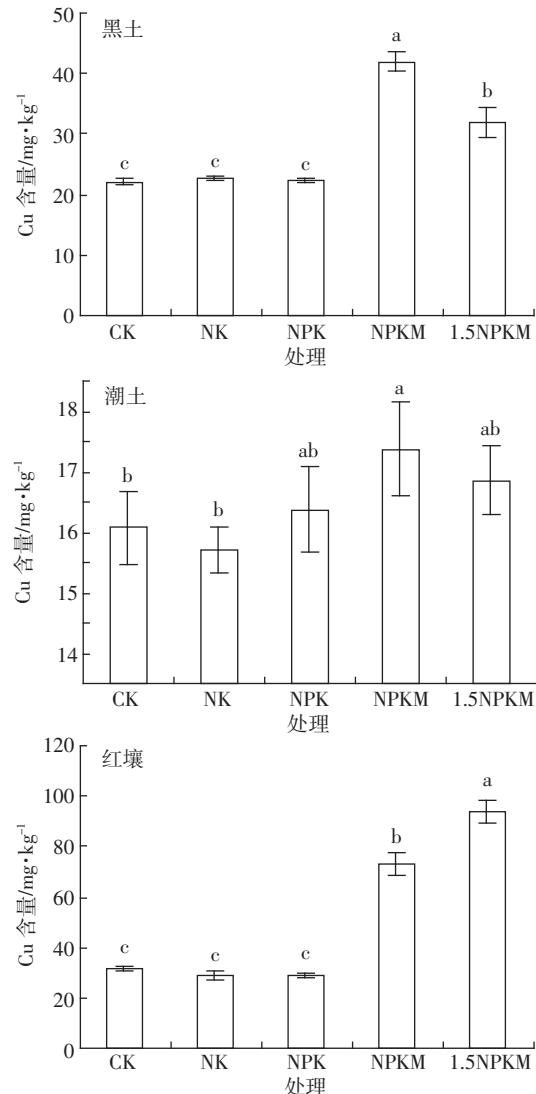
1.4 数据分析

试验数据用统计软件SAS9.1进行方差分析和LSD多重比较,检验不同处理间的差异显著性。用Microsoft Excel 2003进行数据的图表处理。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤Cu累积的影响

黑土上,施用NK和NPK与对照不施肥相比,没有增加土壤Cu含量,说明使用化肥23年没有影响黑土中的Cu含量(图1)。化肥与有机肥配施(NPKM和1.5NPKM)虽显著增加了土壤Cu含量,分别比不施肥处理(CK)增加89.8%、44.9%,比单施化肥处理(NPK)增加88.9%、44.2%,但均未超过国家土壤环境质量二级标准(100 mg·kg⁻¹)^[19]。潮土和红壤上的情况与黑土相似,施用化肥对土壤Cu的累积没有影响,而化肥与有机肥配施显著增加Cu在土壤中的积累(图1)。在潮土上,NPKM和1.5NPKM处理分别比对照增加8.07%、4.84%,比NK处理增加10.6%、7.3%,与NPK处理差异不显著,均未超过国家土壤环境质量二级标准(100 mg·kg⁻¹)^[19]。在红壤上,NPKM和1.5NPKM处理土壤Cu含量分别达73.1、93.7 mg·kg⁻¹,均超过国



误差线上不同字母表示处理间差异显著。下同

Different letters above the bars indicate significant difference at $P<0.05$
The same below

图 1 长期肥料试验不同处理土壤 Cu 全量

Figure 1 Total Cu in soils from different fertilization treatments

家土壤环境质量二级标准($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19], 分别比对照增加 132%、197%, 比 NPK 处理增加 151%、222%。以上结果说明, 三种土壤上 Cu 的累积与施用有机肥有关, 与施用化肥关系不大。此外, 红壤上施用 1.5 倍量化肥和有机肥(1.5NPKM)比常量施肥(NPKM)处理显著提高土壤 Cu 含量。

2.2 长期施肥对土壤 Zn 累积的影响

在黑土、潮土和红壤上施用化肥(NK 和 NPK)与对照相比均未显著增加土壤 Zn 含量(图 2)。在黑土和红壤上施用有机肥(NPKM 和 1.5NPKM)比对照(CK)和单施化肥(NK 和 NPK)显著增加土壤 Zn 含量, 但各处理土壤 Zn 含量均未超过国家土壤环境质

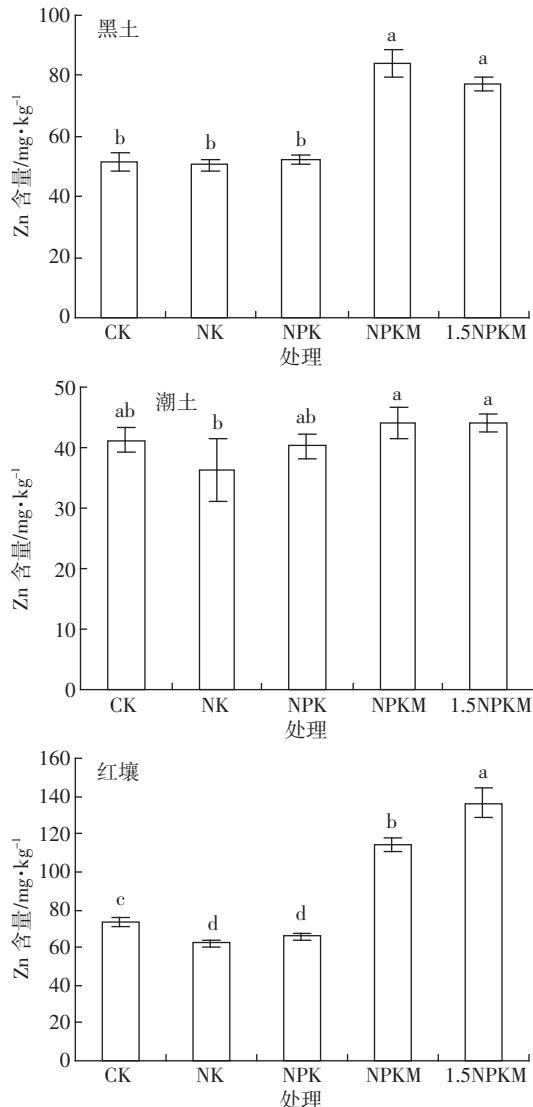


图 2 长期肥料试验不同处理土壤 Zn 全量

Figure 2 Total Zn in soils from different fertilization treatments

量二级标准^[19]。黑土上, NPKM、1.5NPKM 比对照处理土壤 Zn 含量分别增加 63.0%、49.9%, 比 NPK 处理增加 61.7%、48.7%。红壤上, NPKM 和 1.5NPKM 比对照处理土壤 Zn 含量分别增加 55.6%、85.7%, 比 NPK 处理增加 74.0%、108%。红壤上施用 1.5 倍量化肥和有机肥(1.5NPKM)比常量施肥(NPKM)处理显著提高了土壤 Zn 含量。潮土上有机肥和化肥配合施用与对照相比未增加土壤 Zn 含量, 但与 NK 不施磷处理相比显著增加了 Zn 含量, 说明施磷肥和有机肥可增加潮土中 Zn 含量。

2.3 长期不同施肥处理对土壤 Cd 累积的影响

在黑土、潮土和红壤上施用化肥(NK 和 NPK)与对照相比均未显著增加土壤 Cd 含量, 且施化肥处理之间差异不显著(图 3)。潮土上施用有机肥配施化肥

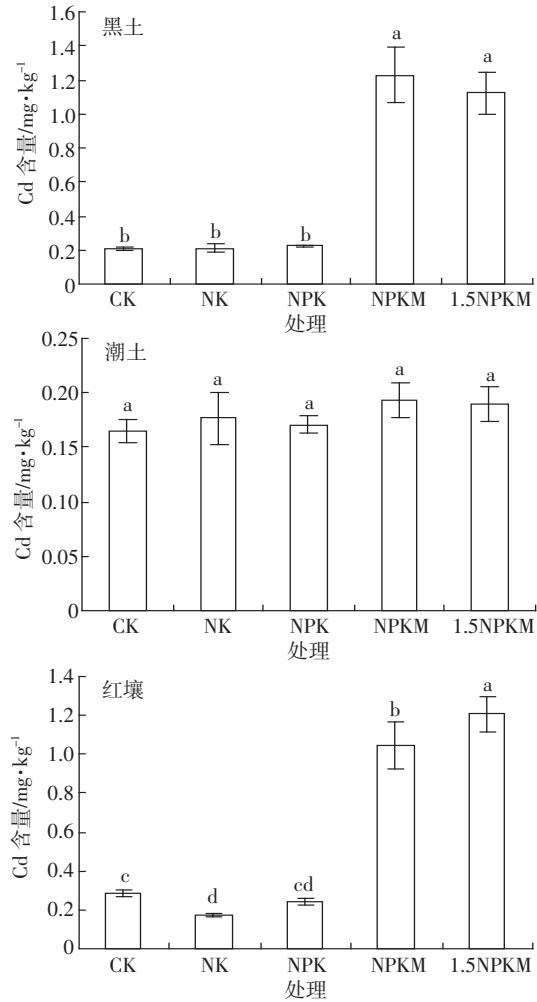


图 3 长期肥料试验不同处理土壤 Cd 全量

Figure 3 Total Cd in soils from different fertilization treatments

对土壤 Cd 没有显著影响,在黑土和红壤上施用有机肥处理(NPKM 和 1.5NPKM)比对照(CK)和单施化肥处理(NK 和 NPK)显著增加土壤 Cd 含量。在黑土上,NPKM 和 1.5NPKM 处理土壤 Cd 含量分别比对照增加 496% 和 446%,比 NPK 处理增加 449% 和 403%,超出国家土壤环境质量标准限定值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19]。在红壤上,NPKM 和 1.5NPKM 处理土壤 Cd 含量分别比对照增加 268% 和 327%,比 NPK 处理增加 331%、400%,超出国家土壤环境质量二级标准。以上结果说明,土壤 Cd 的累积与施用有机肥有关,与施用化肥关系不大。此外,红壤上施用 1.5 倍量化肥和有机肥(1.5NPKM)比常量施肥(NPKM)处理显著提高了土壤 Cd 含量。

2.4 长期不同施肥处理对小麦籽粒和秸秆重金属富集的影响

2.4.1 对小麦籽粒和秸秆 Cu 富集的影响

在潮土上,各施肥处理与对照不施肥处理相比籽

粒 Cu 含量没有显著差异(图 4)。在红壤上,施用化肥显著降低籽粒 Cu 含量,NPK 处理比对照处理降低 29.9%。有机肥配施化肥(NPKM 和 1.5NPKM)比单施化肥(NPK)分别增加小麦籽粒 Cu 含量 28.1% 和 44.6%,但均低于农业部对粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铜的限量值(NY 861—2004, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20]。

长期不同施肥措施对潮土小麦秸秆 Cu 含量没影响。红壤上,单施化肥处理秸秆 Cu 含量显著低于对照不施肥处理,但各施肥处理之间秸秆 Cu 含量差异不显著。

2.4.2 对小麦籽粒和秸秆 Zn 富集的影响

在潮土上,与对照相比除 NK 处理增加小麦籽粒 Zn 含量 44.2% 外,其余施肥处理没有增加小麦籽粒 Zn 含量。在红壤上,化肥配施有机肥处理(NPKM 和 1.5NPKM)比对照和单施化肥处理显著增加籽粒 Zn 的含量,且超出农业部对粮食及制品中 Zn 的限量值(NY 861—2004, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20],分别比对照处理小麦籽粒 Zn 含量增加 28.0%、30.3%,比单施化肥处理增加 65.6%、68.5%。

在潮土上,与对照相比除 NK 处理增加小麦秸秆 Zn 含量外,其余施肥处理没有增加小麦秸秆 Zn 含量。在红壤上化肥配施有机肥(NPKM 和 1.5NPKM)处理的秸秆 Zn 含量显著高于对照和单施化肥处理(图 4)。

潮土上 NK 处理小麦籽粒和秸秆 Zn 含量较高的原因之一可能与其产量较低有关,另一方面可能是不施磷与施磷相比提高了 Zn 的活性^[21-22],这一点也可以从红壤上 NPK 处理籽粒 Zn 含量低于对照而进一步证实。

2.4.3 对小麦籽粒和秸秆 Cd 富集的影响

在潮土上,除 1.5NPKM 处理小麦籽粒 Cd 含量显著高于对照外,其余施肥处理与对照相比均未显著增加其 Cd 含量。在红壤上,各处理籽粒 Cd 含量均超出 NY 861—2004 对 Cd 的限量值($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20],单施化肥相比对照处理籽粒 Cd 含量降低,化肥配施有机肥处理(NPKM 和 1.5NPKM)比单施化肥(NPK)和对照显著增加小麦籽粒 Cd 含量,表明有机肥的施用促进籽粒对 Cd 的富集(图 4)。

潮土上化肥配施有机肥处理(NPKM、1.5NPKM)小麦秸秆 Cd 含量比对照增加 35.2%、28.6%,比 NPK 处理增加 6.9%、1.7%。红壤上,化肥配施有机肥处理(NPKM 和 1.5NPKM)小麦秸秆 Cd 含量比对照增加 80.4%、23.7%,比 NPK 处理增加 100%、37.2%。

2.5 长期施肥对玉米籽粒和秸秆重金属富集的影响

2.5.1 对玉米籽粒和秸秆 Cu 富集的影响

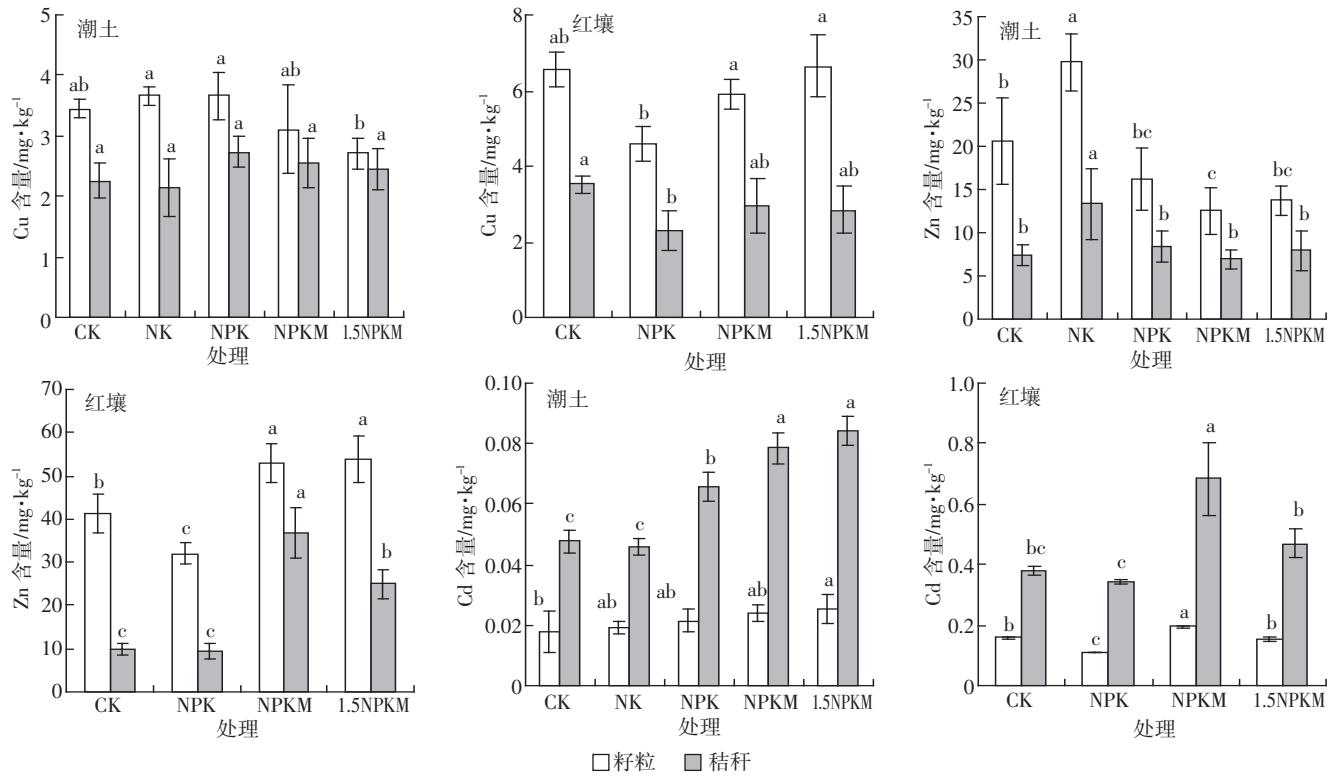


图 4 不同施肥处理小麦籽粒和秸秆 Cu、Zn、Cd 含量

Figure 4 Contents of Cu, Zn and Cd in grain and straw of wheat under different fertilizers

在黑土和潮土上,长期不同施肥处理没有增加玉米籽粒 Cu 含量。在红壤上,化肥配施有机肥处理(NPKM)的玉米籽粒 Cu 含量超出 NY 861—2004 限量值^[20],显著高于对照和单施化肥处理玉米籽粒 Cu 含量(图 5)。

在黑土上,有机肥配施化肥处理比对照和单施化肥降低玉米秸秆 Cu 含量。在潮土上,长期施用化肥(NK 和 NPK)显著增加秸秆 Cu 含量,比对照不施肥处理增加 82.7%~102%。在红壤上,施肥处理秸秆 Cu 含量显著高于对照处理,NPKM 和 1.5NPKM 处理比单施化肥处理显著增加秸秆 Cu 含量(图 5)。

2.5.2 对玉米籽粒和秸秆 Zn 富集的影响

在黑土上,施用 23 年 NK 和 NPK 没有显著影响玉米籽粒 Zn 含量,但化肥配施有机肥显著增加玉米籽粒 Zn 含量,NPKM、1.5NPKM 处理玉米籽粒 Zn 含量分别比对照增加 54.6%、32.2%,比 NPK 处理增加 83.8%、57.2%。说明玉米籽粒对 Zn 的富集与施用有机肥有关,与施用化肥无关。在潮土上,施肥降低玉米籽粒对 Zn 的富集,NK、NPK、NPKM、1.5NPKM 处理籽粒 Zn 含量分别比对照降低 14.4%、28.0%、26.3%、34.6%。在红壤上,化肥配施有机肥与对照不施肥相比,没有增加玉米籽粒 Zn 含量,而单施化肥与对照相

比降低玉米籽粒 Zn 含量(图 5)。

在黑土和潮土上,长期施肥显著降低玉米秸秆 Zn 含量。黑土上 NK、NPK、NPKM、1.5NPKM 处理玉米秸秆 Zn 含量分别比对照降低 44.3%、86.3%、77.4%、77.6%,潮土上 NPK、NPKM、1.5NPKM 处理玉米秸秆 Zn 含量分别比对照降低 68.0%、61.7%、64.3%。这说明,化肥和有机肥能够降低黑土和潮土玉米秸秆对 Zn 的富集。在红壤上,有机肥与化肥配施显著增加秸秆对 Zn 的富集,NPKM、1.5NPKM 处理玉米秸秆 Zn 含量分别比对照增加 65.8%、84.0%,分别比 NPK 处理增加 46.4%、62.4%(图 5)。

2.5.3 对玉米籽粒和秸秆 Cd 富集的影响

在潮土和黑土上,长期施肥对玉米籽粒 Cd 的含量没有显著影响。在红壤上,1.5NPKM 处理籽粒 Cd 含量显著高于单施化肥处理(图 5)。

在潮土上,除 NK 处理外,其余施肥处理没有增加玉米秸秆 Cd 含量。在黑土和红壤上,化肥配施有机肥(NPKM 和 1.5NPKM)比对照和单施化肥显著增加了玉米秸秆 Cd 含量。黑土上,NPKM 和 1.5NPKM 处理秸秆 Cd 含量分别比对照增加 50.8%、195%,且 1.5NPKM 处理比 NPKM 处理显著提高玉米秸秆 Cd 含量。红壤上 NPKM、1.5NPKM 处理玉米秸秆 Cd 含

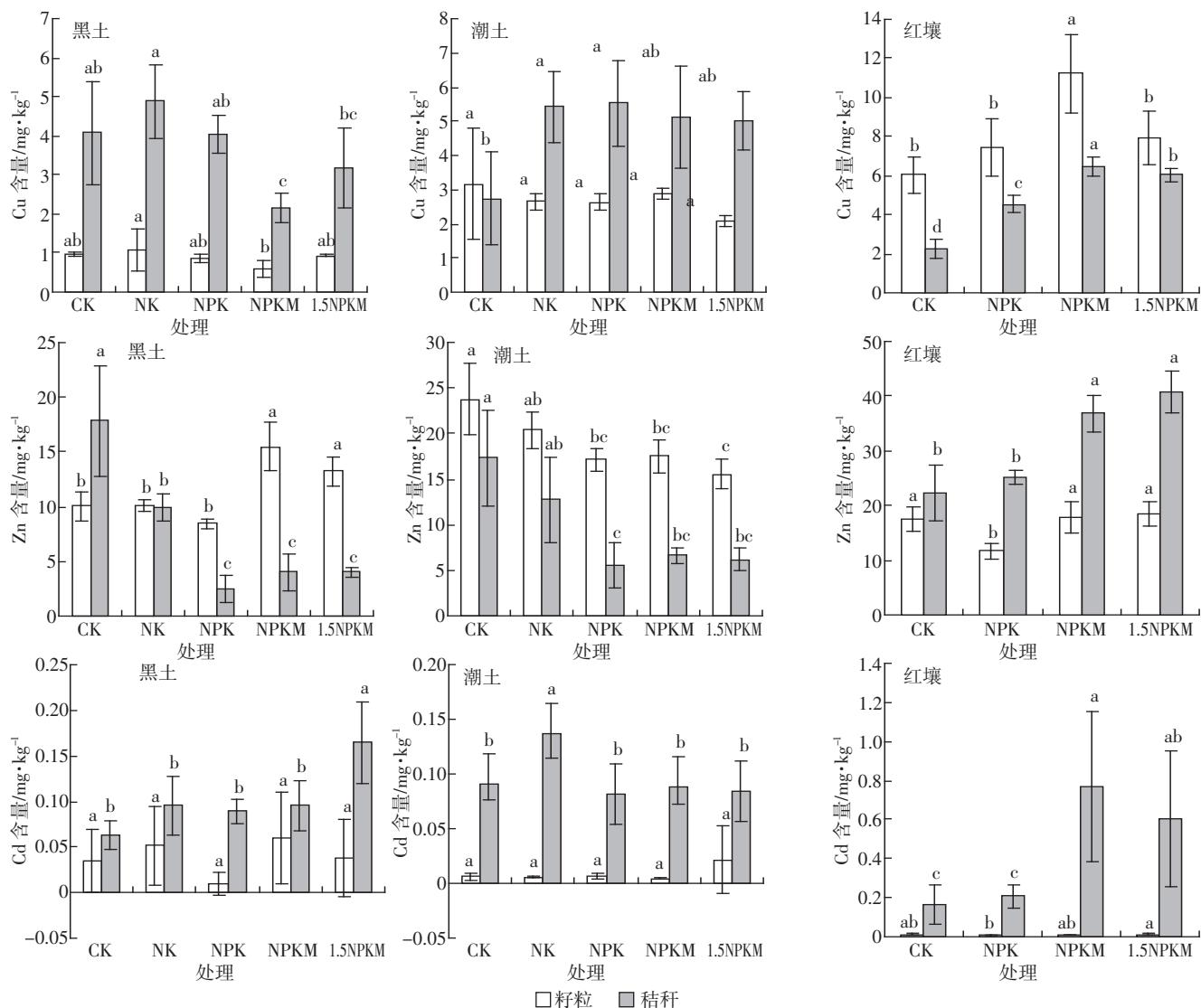


图 5 不同施肥处理玉米籽粒和秸秆 Cu、Zn、Cd 含量

Figure 5 Contents of Cu, Zn and Cd in grain and straw of maize under different fertilizers

量分别比对照增加 78.5%、72.8%，比 NPK 增加 72.8%、65.6% (图 5)。以上结果说明，在黑土和红壤上，玉米秸秆对 Cd 的富集与有机肥有关。

2.6 重金属在小麦、玉米不同部位的富集系数

富集系数是指作物某一部位的元素含量与土壤中相应元素含量之比，是衡量植物对重金属积累能力大小的一个重要指标，富集系数越大，说明对重金属的富集能力越强^[23]。从表 3 可知，除祁阳红壤上 CK、NPK 处理外，其他处理小麦、玉米籽粒和秸秆对重金属的富集系数均小于 1，说明小麦和玉米的重金属富集能力较弱。总之，在潮土和红壤上，小麦籽粒中 Cu、Zn 富集系数明显大于秸秆，而 Cd 的富集系数明显低于秸秆。在潮土上，玉米籽粒 Cu、Zn 的富集系数大于秸秆，Cd 的富集系数小于秸秆；在红壤上，玉米籽粒 Cu 的富集

系数大于秸秆，而 Zn、Cd 小于秸秆；黑土上所有施肥处理玉米秸秆 Cu、Zn 和 Cd 的富集系数明显大于籽粒。小麦籽粒对 Cu、Zn、Cd 的富集系数均高于玉米籽粒。陈虎等^[24]对不同种类作物可食部位 Cd 的富集系数总结中也表明，小麦、玉米因品种、栽培方式、土壤镉含量、土壤类型、pH 等原因，其可食部位富集系数变化较大，但总体趋势是小麦对 Cd 的吸收能力高于玉米。

3 讨论

3.1 长期施肥对土壤重金属累积的影响

本研究表明，长期施用化肥没有增加黑土、潮土和红壤耕层 Cu、Zn 和 Cd 含量，这可能与所施肥料中重金属含量低有关^[25]，也可能是作物移走与通过化肥投入量相当，而使重金属没有在土壤中积累。这一研究

4 结论

连续施化肥20多年对土壤中Cu、Zn、Cd含量没有显著影响,只有长期有机肥与化肥配合施用才是红壤和黑土Cu和Cd富集的主要原因。在现有种植体系和施肥措施下,黑土对Cu、Zn、Cd最高承载年限分别为67年、118年、9年,潮土分别是1042年、2043年、631年,红壤分别是10年、46年、0.5年。限制有机肥中重金属含量及控制有机肥用量是减少重金属在土壤中积累的主要措施。除红壤小麦籽粒Zn和Cd及玉米籽粒Cu含量超出农业部对粮食及制品中重金属限量值外,潮土上小麦和玉米、黑土上春玉米和红壤上玉米籽粒中Cu、Zn、Cd含量虽有富集,但均未超标。

参考文献:

- [1] 贺明龙. 简述施肥对小麦籽粒营养品质的影响[J]. 国外农学—麦类作物, 1986(1):46-47.
- HE Ming-long. Effect of fertilization on nutritional quality of wheat grain[J]. *Foreign Agriculture-crops of Wheat and Barley*, 1986, (1):46-47.
- [2] 汪芝寿, 曹承富, 孔令聪. 施肥对土壤肥力和作物产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 1995, 23(3):241-242.
- WANG Zhi-shou, CAO Cheng-fu, KONG Ling-cong. Effect of fertilization on soil fertility and crop yield and quality[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 1995, 23(3):241-242.
- [3] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 长期定位施肥对小麦籽粒产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(3):76-79.
- GU Qiao-zhen, YANG Xue-yun, SUN Ben-hua, et al. Effects of long-term fertilization on grain yield and quality of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(3):76-79.
- [4] Yang S, Li F, Malhi S S, et al. Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in northwestern China[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4):1039-1049.
- [5] Ayoub M, Guertin S, Lussier S, et al. Timing and level of nitrogen fertility effects on spring wheat yield in eastern Canada[J]. *Crop Science*, 1994, 34(3):748-756.
- [6] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168:44-53.
- [7] 毕淑芹, 谢建治, 刘树庆, 等. 土壤重金属污染对植物产量及品质的影响研究[J]. 河北农业科学, 2006, 10(2):107-110.
- BI Shu-qin, XIE Jian-zhi, LIU Shu-qing, et al. The review of effects of heavy metal pollution in soil on the plant[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2006, 10(2):107-110.
- [8] Upadhyay D, Hejman M, Száková J, et al. Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2009, 85:241-252.
- [9] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境, 2004, 20(2):62-64.
- WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environment risks[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2):62-64.
- [10] 陈同斌, 李艳霞, 金燕, 等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5):643-648.
- CHEN Tong-bin, LI Yan-xia, JIN Yan, et al. The Effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on NPK and heavy metals uptake of wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5):643-648.
- [11] Li X L, Ziadi N, Be'langer G, et al. Cadmium accumulation in wheat grain as affected by mineral N fertilizer and soil characteristics[J]. *Soil Sci*, 2011, 91:521-531.
- [12] Wångstrand H, Eriksson J, Öborn I. Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26:209-214.
- [13] 赵秉强. 施肥制度与土壤可持续利用[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- ZHAO Bing-qiang. Fertilization system and land use sustainability[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [14] 马义兵, 李秀英. 中国生态系统定位观测与研究数据集:农田生态系统卷[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
- MA Yi-bing, LI Xiu-ying. Data set of location observation and research on ecosystem of China: Farmland ecosystem[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000.
- [16] U. S. Environmental Protection Agency. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices, Method 3052[R]. Washington, D C: Office of Solid Waste and Emergency Response. U. S. Government Printing Office, 1996.
- [17] 赵明, 蔡葵, 赵征宇. 微波消解塞曼火焰原子吸收法测定土壤中重金属元素的方法研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(5):670-672.
- ZHAO Ming, CAI Kui, ZHAO Zheng-yu. Determination of heavy metals in soil by microwave digestion with zeeman flame atomic absorption mode[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5):670-672.
- [18] 黄智伟, 王宪, 邱海源, 等. 土壤重金属含量的微波法与电热板消解法测定的应用比较[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46:103-106.
- HUANG Zhi-wei, WANG Xian, QIU Hai-yuan, et al. Comparison of microwave digestion and electric heating board digestion in determining heavy metals content in soils[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2007, 46:103-106.
- [19] 中华人民共和国国家环境保护总局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 1996.
- National Environmental Protection Bureau of the People's Republic of China. GB 15618—1995 Soil environmental quality standard for soils [S]. 1996.
- [20] 中华人民共和国农业部. NY 861—2004 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中的铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量[S]. 2005.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 861—2004 limits of eight elements in cereals, legume, tubers and its products[S]. 2005.

- [21] Gianquinto G, Abu-Rayyan A, Tola D L, et al. Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and yield of dwarf bean grown in two environments[J]. *Plant and Soil*, 2000, 220: 219–228.
- [22] 李惠英, 朱永官. 不同磷锌施肥量对大麦产量及其吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 51–53.
- LI Hui-ying, ZHU Yong-guan. The effects of different levels phosphorous and zinc fertilizers on production and absorption in two barley species[J]. *Chinese Journal and Eco-Agriculture*, 2002, 10(4): 51–53.
- [23] Bose S, Bhattacharyya A K. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge[J]. *Chemosphere*, 2008, 70: 1264–1272.
- [24] 陈虎, 郭笃发, 郭峰, 等. 作物吸收富集镉研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 6–11.
- CHEN Hu, GUO Du-fa, GUO Feng, et al. Research advances on cadmium absorption and accumulation of plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3): 6–11.
- [25] 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, LÜ 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.
- [26] Franklin R E, Duis L, Brown R, et al. Trace element content of selected fertilizers and micronutrient source materials[J]. *Communications of Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36: 1591–1609.
- [27] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration[J]. *Environ Monit Assess*, 2010, 160: 83–89.
- [28] 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 Yuan-hua, AN Qiong, et al. Changes of soil heavy metal content under long-term fertilization[J]. *Soils*, 2005, 37(3): 308–311.
- [29] 鲁如坤, 时正元, 熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150–156.
- 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): 150–156.
- [30] Gramatica P, Battaini F, Giani E, et al. Multivariate analysis of heavy metal concentrations in soils and mosses of two North-Italy regions[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2006, 15(8A): 731–737.
- [31] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩. 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. Effects of long-term located fertilization on heavy metal content of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 96–99.
- [32] 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.
- [33] 朱平, 彭畅, 高洪军, 等. 吉林省玉米主产区土壤环境背景状况与绿色玉米生产[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 96–99.
- ZHU Ping, PENG Chang, GAO Hong-jun, et al. Study on soil environmental background condition and green corn production[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2004, 12(3): 96–99.
- [34] 刘兴久, 赵雅玲. 松嫩平原区域土壤中 8 种重金属元素的背景值及其相关因素[J]. 东北农学院学报, 1987, 18(2): 113–117.
- LIU Xing-jiu, ZHAO Ya-ling. A preliminary study on the background values of 8 heavy metallic elements and relevant factors on Songnen plain[J]. *Journal of Northeast Agricultural College*, 1987, 18(2): 113–117.
- [35] 古德宁, 李立平, 邢维芹, 等. 郑州市城市土壤重金属分布和土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 921–925.
- GU De-ning, LI Li-ping, XING Wei-qin, et al. Distribution of heavy metals in urban soils of Zhengzhou City and soil quality assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 921–925.
- [36] 李玲, 冯新伟, 路婕, 等. 郑州市城市化进程中土壤环境质量评价[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(5): 99–103.
- LI Ling, FENG Xin-wei, LU Jie, et al. Soil environmental quality evaluation of Zhengzhou City on the way towards urbanization[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(5): 99–103.
- [37] 唐诵六. 土壤重金属地球化学背景值影响因素的研究[J]. 环境科学学报, 1987, 7(3): 245–251.
- TANG Song-liu. Factors effecting the geochemical background contents of heavy metals in different soils of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1987, 7(3): 245–251.
- [38] Canadian Council of Ministers of the Environment(CCME). Guidelines for Compost Quality[S]. Winnipeg, 1995.
- [39] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 2524–2530.
- [40] Brinton W F. Compost Quality Standard & Guidelines[R]. Mount Vernon: Woods End Research Laboratory Inc., Dec. 2000.
- [41] Lakhdar A, Achiba W, Montemurro F, et al. Effect of municipal solid waste compost and farmyard manure application on heavy metal uptake in wheat[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40: 3524–3538.
- [42] Jahiruddin M, Livesey N T, Cresser M S. Observations on the effect of soil pH upon zinc absorption by soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1985, 16: 909–922.
- [43] Clemente R, Paredes C, Bernal M P. A field experiment investigating the effects of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia(Spain)[J]. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2007, 118: 319–326.
- [44] Landberg T, Greger M. Influence of N and N supplementation on Cd accumulation in wheat grain[C]// Conference Proceedings of 7th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Uppsala, 2003: 90–91.