

文章编号: 1003-8701(2015)05-0037-05

不同施肥模式下土壤-玉米中重金属 累积规律及安全性分析

曹铁华, 梁烜赫, 高洪军, 彭 畅,
张秀芝, 徐 晨, 陈宝玉, 朱 平*

(吉林省农业科学院, 长春 130033)

摘 要:施用化肥(N、P、K)土壤中重金属(Ni、Cu、Zn、As、Pb)仅有少量残留或不残留;农家肥和化肥配施土壤中Cr、Cu、Zn、Cd、Pb出现了累积效应;单施用化肥增加了土壤中的Cr和Cd累积,随着有机肥料的施入使这两种重金属的风险加剧,特别是农家肥和化肥配施更进一步提高了重金属Cr、Cd以及Cu、Zn的风险。施肥可增加Ni、As、Pb在植株中的富集,减少Zn的吸收。单施化肥提高植物体Cd的富集,农家肥和化肥配施可减少Cr、Cu、Cd和Pb向植物体的富集。通过预测,化肥的使用短期内不会存在子粒中重金属超标的危险,农家肥和化肥混施条件下Cr、Zn、Cu超标的预防应该引起注意。

关键词:重金属;施肥模式;富集;残留

中图分类号: S153

文献标识码: A

Accumulation and Risk Analysis of Heavy Metals in Soil-Maize Cropping System under Different Fertilization

CAO Tie-hua, LIANG Xuan-he, GAO Hong-jun, PENG Chang,

ZHANG Xiu-zhi, XU Chen, CHEN Bao-yu, ZHU Ping*

(Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The results showed that with the application of chemical fertilizers (N, P, K) alone, concentrations of heavy metals (Ni, Cu, Zn, As, Pb) in soils changed insignificantly, but the concentration of Cr and Cd increased. However, in plots amended with chemical fertilizers plus organic manure, concentrations of Cr, Cu, Zn, Cd and Pb in soils increased, which might raise potential risk of soil heavy metals contamination, especially the pollution of Cr, Cd, Cu and Zn. Application of fertilizers alone or combined with organic manure led to increment in concentrations of Ni, As and Pb in maize plant, but the concentration of Zn reduced. The accumulation capacity of Cd in maize plant increased in plots amended with chemical fertilizers alone, but that of Cr, Cu, Cd and Pb in maize plant decreased significantly with the combined application of chemical fertilizers and organic manure. It was predicted that short term application of chemical fertilizers alone would not result in heavy metals pollution in maize seeds, but it was suggested to pay more attention to the Cr, Zn and Cu pollution caused by application of chemical fertilizers plus organic manure.

Key words: Heavy metals; Fertilization; Accumulation; Residual

随着人们生活水平的提高,对食品安全的关注日益增强,在影响食品安全的诸多因素中,来自土壤的重金属污染更为突出^[1]。农业生产对肥

料的需求必不可少,其中化学肥料的过度施用会造成重金属镉、汞、砷、铅、铬等对土壤的污染^[2]。在常用的几类化学肥料中,通常氮素肥料和钾肥的重金属含量较低,但磷肥以及一些含磷复合肥会混杂重金属^[3-5]。同时施用畜禽粪便作为有机肥虽然有着悠久的历史,但是随着养殖业的不断发展,动物饲料中添加的部分重金属元素(Zn、Cu、Cr、As等)对畜禽的生长发育和生殖有重要作用,而畜禽对重金属元素的利用率却很低,绝大部分随畜禽粪便排出体外释放到了环境中,长期

收稿日期: 2015-05-09

基金项目: 吉林省世行贷款农产品质量安全项目(2011-Z05);吉林省农业科技创新工程项目(2013007)

作者简介: 曹铁华(1974-),男,博士,副研究员,主要从事农产品质量安全工作。

通讯作者: 朱 平,男,博士,研究员, E-mail: zhuping1962@sohu.com

大量无节制地使用畜禽粪便作为有机肥,施入土壤后富集在作物体内,有可能对土壤环境和人体健康带来重金属污染的潜在风险^[6-7]。目前,我国农业中常用的施肥方式有化肥、秸秆还田和有机无机配施,长期按照这种施肥习惯农田重金属的累积及玉米对重金属的富集后子粒安全状况还鲜有报道。因此,本研究就以上3种长期施肥模式下土壤、玉米中重金属的累积规律及安全性进行评价与分析。

1 材料与方 法

1.1 试验设计与材料

供试土壤及植株样本于2012年取自农业部公主岭黑土生态环境重点野外观测站长期定位培肥试验地,培肥试验始于1987年。试验设无肥(CK)、化肥(NPK)、秸秆+化肥(SNPK)和农家肥+化肥(MNPK)4个处理,小区面积400 m²,无重复。施肥量如表1。各处理肥料重金属含量水平如表2。

表1 各处理的施肥水平

	N (kg/hm ²)	P (kg/hm ²)	K (kg/hm ²)	Manure (t/hm ²)
CK	0	0	0	0
NPK	165	82.5	82.5	0
秸秆+NPK	112	82.5	82.5	7.5
M+NPK	165	82.5	82.5	30.0

注:有机肥为猪粪,有机质含量平均在150~240 g/kg;秸秆为小区原位还田

每个处理收获时3次重复取样,每个重复以S形四点取土,均匀混合后形成一个土样,同时每个重复取玉米3株,按照根、茎、叶、子粒分装。土壤、植株风干后粉碎、研磨,均匀混合后过100目筛,留待测定分析。试验田不使用任何农药和除草剂,人工除草,白僵菌防治玉米螟。

1.2 测定方法

锌(Zn)、铜(Cu)、铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)采用王水回流消解原子吸收法 NY/T1613-2008 测定,镍(Ni)、砷(As)采用微波消解—电感耦合等离子体发射光谱/质谱联用法测定。

1.3 预测分析方法

根据相关报道,重金属富集系数=植物中重金属含量/土壤中重金属含量×100%,转运系数=地上部重金属含量/根部重金属含量^[8]。目前土壤环境质量和国家规定的谷物中重金属含量标准分别是环境和卫生两个部门根据暴露评估和摄取试验而规定的,其实没有把土壤重金属含量和谷物中重金属很好地结合起来,进而出现土壤中重金属含量不超标的情况下存在谷物超标的现象,同时也存在土壤中重金属不超标谷物不超标的现象。为此本研究反用重金属富集系数的公式,以国家规定的谷物中重金属含量限值为基准(表3),除以子粒中重金属富集系数,求得土壤中重金属的安全阈值,减去土壤重金属实测值,再除以土壤中重金属的累积速率,进而求得不同施肥模式下距目前土壤中重金属的安全年限。其中土壤重金属累积速率中由于没有25年前本实验田重金属原始背景数据,以吉林省1982年普查的环境背景数据来计算(表3),其中子粒中重金属含量超标的情况下安全年限视为0。计算公式如下:

(1)土壤重金属的累积速率(a)=(实测值-吉林省土壤元素背景值)÷30

(2)子粒的富集系数(b)=子粒重金属含量/土壤重金属含量×100%

(3)土壤中重金属安全阈值(x)=子粒重金属含量限值÷b

(4)土壤中重金属的安全年限(y)=(x-土壤中重金属实测值)÷a

表2 各处理肥料中重金属含量

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
化肥	72.27	痕量	9.52	23.81	痕量	0.32	5.20
秸秆	2.65	6.28	9.71	16.58	0.74	0.06	1.66
农家肥	18.83	10.10	52.90	160.30	6.56	0.94	14.05

表3 玉米子粒中重金属限量、吉林省土壤元素背景值^[9]

	Pb	Cd	As	Ni	Cr	Cu	Zn
玉米籽粒	0.2	0.1	0.5	1.0	1.0	10	50
元素背景值	22.16	0.095	5.93	20.07	48.29	15.10	61.79

2 结果与讨论

2.1 不同施肥模式下土壤中重金属的变化规律

从表4可以看出,与对照相比,单独施用化肥(NPK)和秸秆还田与化肥配施(SNPK)处理25年,土壤中各种重金属含量差异不显著,但施用有机肥料(MNPK)处理,土壤中Cr、Cu、Cd、Zn含量与对照相比明显增加,且差异显著。说明NPK

和SNPK处理在25年施肥过程中重金属在土壤中的累积少或未表现出累积,而有机肥与化肥配施则造成了重金属Cr、Cu、Zn、Cd在土壤中的累积。重金属Ni在施肥情况下有减少的趋势,As随着有机肥的施入有增加的趋势。重金属Cr、Cd、Pb含量在3个处理中NPK<SNPK<MNPK,随着有机肥的施入有增加的趋势。

表4 不同施肥模式下土壤中重金属含量

mg/kg

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
CK	67.49b	132.03a	26.69b	82.48ab	13.82a	0.15b	26.89ab
NPK	80.69b	120.78a	25.12b	80.03b	13.54a	0.17ab	26.10b
SNPK	92.84ab	130.15a	25.72b	84.57ab	14.50a	0.19ab	27.13ab
MNPK	127.19a	123.90a	36.64a	106.21a	14.21a	0.83a	27.50a

注:相同字母表示处理间差异不显著($p>0.05$),下同

2.2 不同施肥模式下土壤中重金属的累积速率

从表5可以看出,3种施肥模式下总体来看重金属的累积速率以单独施用化肥为最低,SNPK处理居中,有机肥与化肥配施最高。7种重金属中在3个处理中除了Ni负增长以外,其中Cr的累积

速率最高,其次是Cu、Zn在MNPK处理中的累积速率较高。NPK处理中除了重金属Cr和Cd有累积外,其他5种重金属都出现了负增长。随着有机物料的增加,重金属出现累积的种类增加,特别是MNPK处理累积速率显著提高。

表5 不同施肥模式下土壤中重金属的累积速率

mg/kg.a

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
CK	0.64	3.73	0.39	0.69	0.26	0.0018	0.16
NPK	1.08	3.56	0.33	0.61	0.25	0.0024	0.13
SNPK	1.49	3.67	0.35	0.76	0.29	0.0032	0.17
MNPK	2.63	3.46	0.72	1.48	0.28	0.0245	0.18

2.3 不同施肥模式下玉米植株中重金属的富集规律

富集系数表示植物对土壤中重金属的吸收能力,同时也表示重金属向植物体转移的难易程

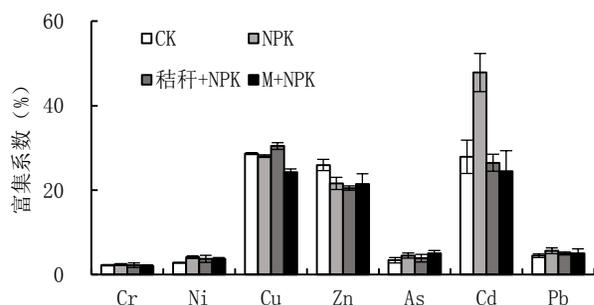


图1 不同施肥模式下玉米植株中重金属的富集系数

度。从图1可以看出,Cu、Zn、Cd在植株中富集要高于其他4种重金属。施肥处理增加了Ni、As、Pb向植株中的富集,减少了Zn的吸收。单独施用化肥提高了重金属Cd向植物体的富集,随着有机物料的增加,特别是化肥和有机肥混施减少了Cr、Cu和Cd向植物体的富集。

2.4 不同施肥模式下子粒中重金属含量及向子粒中转运规律

从表6可以看出,4个处理在子粒中的重金属含量除了重金属Pb以外,NPK和SNPK处理与对照无显著差异。NPK处理没有增加重金属在子粒中的累积,而SNPK处理在Pb,MNPK处理在Ni、As含量上达到了显著水平,出现了累积效应。与粮食污染物限量标准对比MNPK处理的Ni和NPK、SNPK处理的Pb都超过了规定的范围。

表6 不同施肥模式下子粒中重金属含量

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
CK	0.22a	0.47b	2.55a	19.83ab	0.02b	0.00a	0.19bc
NPK	0.33a	0.71b	2.71a	16.36b	0.05ab	0.01a	0.26b
SNPK	0.27a	0.66b	2.20a	19.53ab	0.04ab	0.01a	0.44a
MNPK	0.46a	1.58a	2.82a	23.16a	0.06a	0.01a	0.11bc

mg/kg

转运系数表示根部的重金属向地上部分的分配比例,即地上部重金属含量/根部重金属含量。从图2子粒的转运系数可以看出,植物体内重金

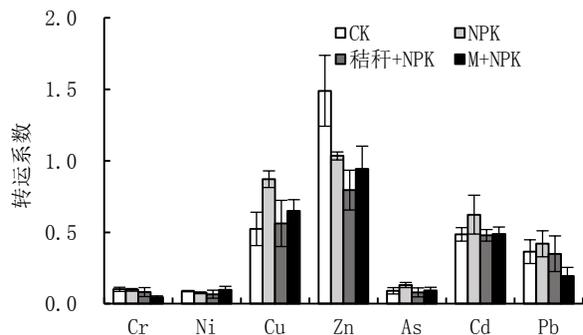


图2 不同施肥模式下植株中重金属向子粒的转运系数

属向子粒的转运以Cu、Zn、Cd、Pb的系数较高,说明这4种重金属比较容易向子粒中转移。NPK处理促进了Cu、As、Cd、Pb抑制了Zn向子粒中的迁

移;随着有机物料的加入,抑制了重金属Cr、Zn、Pb向子粒的迁移,但促进Cu向子粒中的转移。

2.5 不同施肥模式下玉米安全性的预测

根据我国粮食污染物限量标准,通过结合不同施肥模式下玉米子粒中重金属含量以及土壤中的重金属含量变化,笔者预测出不同施肥模式对土壤中重金属主要的安全风险点和可能的安全年限的影响。从表7可以看出,MNPK处理的Ni和NPK、SNPK处理的Pb已经存在风险,说明施用农家肥可能导致玉米子粒中Ni的累积,而施用化肥和秸秆化肥配施可能造成Pb的增加,应及早防治。同时,随着肥料的施入增加了Cr、Ni、As、Cd的风险;在化肥的基础上,随着秸秆的施入,提高了Zn、Cd的风险,降低了Cr、Cu、As的风险;农家肥和化肥混施更进一步提高了重金属Cr、Cd、Cu、Zn、As的安全风险,相反却增加了铅的安全系数。

表7 不同施肥条件下玉米子粒中重金属的安全年限

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
CK	471	75	264	273	1062	1667	175
NPK	223	50	269	375	509	701	0
SNPK	234	53	325	259	706	535	0
MNPK	105	0	177	139	400	357	273

a

3 结论

3.1 不同施肥模式对土壤、玉米植株和子粒中重金属累积规律影响不同

此次虽然只是对长期定位培肥试验的4个处理区的土壤、植株和子粒样本进行分析比较,但基本可以明确施肥模式对土壤、植株及子粒中重金属累积的影响。化肥对土壤中重金属Ni、Cu、Zn、As、Pb的影响较小,农家肥对土壤Cr、Cu、Zn、Cd、Pb影响较大;化肥和有机肥料的施入均增加了土壤中的Cr和Cd累积,也使玉米植株中Ni、As、Pb含量增加。植物体中Cd的富集与施用化肥关系密切,农家肥与化肥配施可减少植物体对某些重金属的吸收。

3.2 不同施肥模式对土壤中重金属累积效果的影响比较明显

有机肥料的施入显著增加土壤中重金属的累积,单独施用化肥和秸秆还田配施化肥增加的效果不显著。说明长期单独施用化肥及适量的秸秆+化肥的条件下,虽然携入一定量的重金属,但由于作物对这些重金属的吸收和产品(包括作物秸秆)的移出,在一定程度上使土壤-植物系统之间能维持一种输入和输出的平衡^[9-10]。重金属在随着化肥的施用带入土壤的条件下,随着有机物料特别是畜禽粪便的大量施用,增加了重金属在土壤中的输入量,可造成重金属在土壤中的累积^[11-13]。

3.3 施肥增加了玉米植株中重金属的富集

施肥增加了玉米植株中重金属Ni、As的富

集,单独施用化肥明显增加了重金属Cd的富集。随着有机物料的增加,特别是农家肥和化肥配施虽然增加土壤中重金属Cr、Cd、Zn、Cu、Pb的累积,但是与植株中几种重金属的富集效应并无明显相关性,说明施用有机物料可有效降低玉米植株包括子粒对Pb、Cd等重金属的吸收^[14]。

有机物料进入土壤后可通过分解过程产生的有机酸和二氧化碳及硝化作用等提供的质子,降低土壤pH值。也可通过分解过程释放的碱性物质以及渍水条件下还原铁、锰等过程,使pH值升高,pH值的变化直接影响重金属的吸收沉淀作用。高pH值的水溶性有机物,会提高土壤的可变负电荷,促进重金属的水解作用,从而促进土壤对重金属的吸附;低pH值的水溶性有机物则反之。有研究表明,在酸性范围内,随着土壤溶液pH的增加,Cu、Cd、Pd、Zn等重金属可溶态的浓度降低,有机结合态的浓度增加^[15]。其次,土壤中有有机物质的增加改变土壤中重金属元素的化学形态分布,增加或降低土壤中重金属的移动性。最后,有机物质加入到土壤中后,影响重金属的植物有效性。有机物料的分解产物会向植物提供有机营养,改变植物的生理活性,从而影响植物对重金属的吸收。张莉等研究表明,有机肥的施用影响了土壤有效态Hg和有效态Pb的含量,进而影响作物对土壤中Hg和Pb的吸收^[17]。因此,有机物料的加入可能对重金属起到活化作用也可能起到固定作用。有机物料特别是农家肥的施入对部分重金属起到了固定作用,进而也抑制或减少了Cr、Cd、Zn、Cu、Pb,增加了Ni、As在子粒中的累积,这与国内外的一些研究结果相近^[16-19]。

3.4 不同施肥模式下土壤中重金属主要的安全风险点

不同施肥模式土壤中重金属Ni皆呈负增长,Pb变化不明显。说明单施化肥、化肥+秸秆还田和有机肥料与化肥配合施用的3种施肥模式下重金属Ni的输入较少,同时这3种施肥模式对土壤中Pb的影响也比较小,但Cr、Cd、Zn、Cu增加较明显。说明施肥模式不同改变了土壤环境,某些重金属如Ni被活化、吸收利用,某些重金属如Pb可能被钝化,从而导致子粒中某些重金属超标的现象^[20-21]。同时,单独施用化肥增加了Cr和Cd的风险,说明化肥主要带入的是重金属Cr和Cd^[2,4-5]。随着有机物料的增加重金属的风险种类增加,特别是农家肥的施用在Cr、Cd的基础上进一步增加了Cu、Zn的风险^[22-24]。

综上所述,单独施用化肥条件下,正确把握施肥量和化肥中重金属含量可以维持土壤中重金属的进出平衡;有机肥和化肥配施的条件下,在保证营养的基础上合理搭配比例在一定程度上完全可以保证玉米的安全性和减少重金属在土壤中的累积,配施的平衡关系有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 188-213.
- [2] 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评价[J]. 土壤学报, 1992, 23(2): 150-157.
- [3] 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.
- [4] 陈海燕, 高雪, 韩峰. 贵州省常用化肥重金属含量分析及评价[J]. 耕作与栽培, 2006(4): 18-19.
- [5] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查与分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2): 223-226.
- [6] 黄玉溢, 陈桂芬, 刘斌, 等. 畜禽粪便中重金属含量、形态及转化的研究进展[J]. 广西农业科学, 2010, 4(8): 807-809.
- [7] 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.
- [8] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属Cu、Pb、Zn、Cr、Cd在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2): 110-116.
- [9] 孔文杰, 倪吾钟. 有机无机肥配合施用对土壤-水稻系统重金属平衡和稻米重金属含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(5): 517-523.
- [10] 刘昱东. 辽宁省有机肥中重金属含量调查分析及科学施用有机肥的建议[J]. 农业科技与装备, 2012(1): 10-12.
- [11] 曲德鹏, 唐刚. 施用不同肥料组合对辣椒地重金属含量的影响[J]. 上海蔬菜, 2011(6): 75-76.
- [12] 陈苗, 崔岩山. 畜禽固废沼肥中重金属来源及其生物有效性研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 249-255.
- [13] 冯伟, 杨军芳, 周晓芬, 等. 施用鸡粪菜田的土壤重金属含量状况研究[J]. 河北农业科学, 2012, 16(1): 76-79.
- [14] 李影, 吴景贵, 陈猛. 不同有机物料与化肥配施对黑土重金属各形态的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 178-182.
- [15] 蒋煜峰, 袁建梅, 卢子扬, 等. 腐殖酸对污灌土壤中Cu、Cd、Pd、Zn形态影响的研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(6): 42-46.
- [16] 张莉, 刘文拔, 丛兰庆, 等. 不同有机肥施用量对小麦吸收重金属汞和铅的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(4): 64-67.
- [17] Casale W, Minassian L, Menge V, et al. Urban and agricultural wastes for use as mulches on avocado and for delivery of microbial biocontrol agents[J]. Journal of Horticultural Science, 1995(70): 315-332.

(下转第62页)

- genetic variation in finnish potato late blight populations, 1997–2000[J]. *Plant Pathology*, 2007, 56(3): 480–491 .
- [7] Chacón M, Adler N, Jarrin F, et al. Genetic structure of the population of *Phytophthora infestans* attacking *Solanum ochranthum* in the Highlands of Ecuador[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2006(115): 235–245 .
- [8] Zhang X Z, Kim H Y, Kim B S. Analysis of genetic diversity of *Phytophthora infestans* in Korea by using molecular markers[J]. *Microbiol Biotechnol*, 2006(16): 423–430 .
- [9] Achbani E H, Haifidi M, Abdellatif B, et al. Potato late blight in Morocco: characterization of *Phytophthora infestans* populations (virulence and mating type)[J]. *Commun Agric Appl Biol Sci*, 2005(20): 247–252 .
- [10] 张志铭,李玉琴,田世民,等. 中国发现马铃薯晚疫病菌 A2 交配型[J]. *河北农业大学学报*, 1996(19): 63–65 .
- [11] 赵志坚,王淑芬,李成云,等. 云南省马铃薯晚疫病菌交配型分布及发生频率[J]. *西南农业学报*, 2001, 14(4): 55–57 .
- [12] 朱杰华,张志铭,李玉琴. 马铃薯晚疫病(*Phytophthora infestans*)A2 交配型的分布[J]. *植物病理学报*, 2000, 30(4): 375 .
- [13] Avila-Adame C, Gomez-Alpizar L, Zismann V, et al. Mitochondrial genome sequences and molecular evolution of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*[J]. *Curr Genet*, 2006(49): 39–46 .
- [14] Griffith G W, Shaw D S. Polymorphisms in *Phytophthora infestans*: Four mitochondrial haplotypes are detected after PCR amplification of DNA from pure cultures or from host lesions[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1998, 64(10): 4004–4014 .
- [15] Eriwin D C, Ribeiro O K. *Phytophthora* disease worldwide[M]. USA Saint: Am Phytophthora Soc, 1996: 186–190 .
- [16] Masrhall-Farra K D, McGrath M, Jmaes R V, et al. Characterization of *Phytophthora infestans* in Wisconsin from 1993 to 1995 [J]. *Plant Disease*, 1998, 82(4): 434–436 .
- [17] 毕朝位,杜喜翠,车兴壁,等. 重庆地区马铃薯晚疫病菌对甲霜灵抗性及其抗性水平测定[J]. *中国马铃薯*, 2002, 16(2): 70–72 .
- [18] 王彦凤. 中国马铃薯主产区晚疫病菌群体结构研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2011 .
- [19] 赵志坚. 云南致病疫霉交配型、甲霜灵敏感性、mtDNA 单倍型及其群体演替研究[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(4): 727–734 .
- [20] 王 晨. 马铃薯晚疫病菌的表现型和 SSR 基因型分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2010 .
- [21] 姚国胜. 中国部分地区马铃薯晚疫病菌遗传多样性研究[D]. 保定:河北农业大学, 2006 .
- [22] 沈江卫. 马铃薯晚疫病菌 SSR 基因型分析及对啞菌酯和精甲霜灵的敏感性测定[D]. 保定:河北农业大学, 2008 .
- [23] 徐生军. 马铃薯晚疫病菌的表现型与基因型的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2010 .
- [25] Fry W E, Goodwin S B. Re-emergence of potato and tomato late blight in the United States [J]. *Plant Disease*, 1997(81): 1349–1357 .

(责任编辑:范杰英)



(上接第 41 页)

- [18] 张亚丽,沈其荣,姜 洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 212–218 .
- [19] 梁 平. 不同来源有机肥对玉米品质及重金属吸收的调控研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2008 .
- [20] 王 林,周启星. 农艺措施强化重金属污染土壤的植物修复[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 772–777 .
- [21] 孙文彬,李必琼,赵秀兰. 不同秸秆与城市污泥好氧堆肥过程中重金属质量分数及形态变化[J]. *西南大学学报*, 2012, 34(3): 90–94 .
- [22] Ko H J, Kim K Y, Kim H T, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste Management*, 2008, 28(5): 813–820 .
- [23] 吴清清,马军伟,姜丽娜,等. 鸡粪和垃圾有机肥对苜蓿菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1302–1309 .
- [24] 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 .

(责任编辑:王 昱)