

不同磷肥浓度下土壤-水稻系统重金属的时空累积特征

陈宝玉, 王洪君, 曹铁华, 梁烜赫, 杨建, 任军

(中国农业科技东北创新中心农业环境与资源研究中心, 长春 130033)

摘要:针对磷肥是水稻田重金属污染的主要来源,采用田间试验与室内分析相结合的研究方法,在吉林省九台市饮马河老稻田区,开展5种磷肥浓度处理对土壤-水稻系统重金属Cd和Pb的时空累积、分布特征研究。结果显示,磷肥中Cd和Pb含量高于土壤背景值,但没有超出国家土壤环境质量(二级)限定范围。磷肥施入土壤后,部分滞留在土壤里,少量向地上部分迁移,水稻根部累积重金属含量较高。随水稻生育期的变化,成熟期重金属在根、叶和籽实累积量最大,茎的重金属累积量在孕穗期达到最大。重金属Cd在水稻各器官的迁移能力为根>籽粒>叶>茎, Pb的迁移能力为根>叶>籽粒>茎, Cd在水稻地上部分的迁移能力要明显强于Pb。磷肥施用量和重金属含量的关系可用线性回归方程来模拟,相关性检验显示重金属累积量与磷肥施用浓度均达到显著相关($P < 0.01$)(除根中Cd含量与磷肥浓度达到0.05显著水平),说明水稻栽培生产中过量使用磷肥,能产生重金属对土壤和稻米的污染,进而导致重金属对人畜健康的潜在威胁。

关键词:磷肥;土壤-水稻系统;重金属;时空累积;非点源污染

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)12-2274-07

Spatio-temporal Characteristics of Heavy Metal Accumulation in Soil-rice Cropping System Under Different Phosphate Fertilizer Concentrations

CHEN Bao-yu, WANG Hong-jun, CAO Tie-hua, LIANG Xuan-he, YANG Jian, REN Jun

(Agricultural Environment and Resource Research Center, Northeast Agricultural Research Center of China, Changchun 130033, China)

Abstract: To further understand the phosphate fertilizer as a major pollution source of heavy metals in paddy field, we used the field test and the indoor analysis technique to study spatio-temporal accumulation, distribution characteristics of Cd and Pb elements in soil-rice system. The study site was located in old-paddy field, Rinma River, Jiutai in Jilin Province, and the phosphate fertilizer in our experiments was separated into five treatment concentrations. Our results showed the contents of Cd and Pb elements in the phosphate fertilizer were higher than that in soil, but not more than the limited values of national secondary standards of soil environment quality. After heavy metals in soil and phosphate fertilizer were absorbed by rice plant, a majority of these metals were still detained in the underground part, only a little were carried to aboveground part of rice. Of all the parts of rice plants, heavy metals accumulation concentrations in rice roots were the highest. The concentration of heavy metals in root, leaf and paddy reached the highest level in autumn as the rice gets mature. The trans-conductive sequences of Cd and Pb elements in different part of rice were: root>paddy>leaf>stem and root>leaf>paddy>stem, and the sequence of two heavy metals in aboveground parts of rice was: Cd > Pb. The relationship between the treatment concentrations of phosphate fertilizer and content of heavy metals in soil and rice plant was analyzed by using linear regression. Statistical test showed that the treatment concentrations of phosphate fertilizer were significantly correlated with content of heavy metals ($P < 0.05$). Our study indicated that applying excessively phosphate fertilizer might lead to heavy metals pollution in soil-rice system, even potential menace to people and livestock.

Keywords: phosphorus fertilizer; soil-rice system; heavy metals; spatio-temporal accumulation; non-point source pollution.

收稿日期:2010-06-09

基金项目:中国农业科技东北创新中心引进高层次人才科研启动费项目和博士后启动基金项目

作者简介:陈宝玉(1976—),男,博士,副研究员,主要从事农业生态研究。E-mail:bych76@126.com

通讯作者:任军 E-mail:renjun557@163.com

随着工农业生产的迅猛发展,重金属对生态环境的污染越来越严重。20 世纪 50—60 年代,日本发生的骨痛病和水俣病,便分别是由于食用被镉污染的土壤生产的“镉米”和长期食用含甲基汞的鱼而造成的汞中毒所致^[1];我国污灌造成的土壤重金属污染较严重的地区有沈阳的张士灌区、兰州白银灌区和桂林阳朔兴坪乡等,并且沈阳也曾经发生过类似的“镉米”事件^[2]。由此可见,过量的重金属在土壤-植物体系中大量积累,不仅严重影响植物的生长发育,而且可以经食物链危及动物和人类等^[3]。

我国 60% 的人口以稻米为主食^[4],所以对稻米的需求量很大。现代水稻生产中大量化肥的使用,在增加水稻产量的同时,也造成了土壤环境污染和稻米品质的下降。重金属元素是化学肥料中最主要的污染物质,氮、钾肥料中的重金属含量较低,磷肥中含有较多的有害重金属,是土壤和粮食作物污染的主要贡献者^[5]。因为磷肥主要来源于磷矿石,磷矿石中含有许多有害杂质,其中包括镉、铅等重金属元素,这些重金属元素 60%~80% 会在磷肥的生产过程中转移到肥料中^[6]。而磷肥的当季利用率仅达到 10%~25%,大部分施入土壤中的磷肥不能被当季作物利用而积累在土壤中^[7],所以过多施用磷肥会导致土壤中的重金属含量增加,进而对人畜健康造成潜在威胁。国外对磷肥中重金属造成土壤、农产品污染的研究较多^[8-10],而国内相关研究资料较少。本文采用田间试验和室内分析测定相结合的方法,研究不同磷肥施用量对土壤-水稻系统重金属累积的影响,以期水稻生产中合理使用磷肥和水稻安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试水稻品种

水稻品种为吉林省农业科学院水稻研究所培育的新品种吉粳 806。该品种 2006 年参加吉林省筛选试验,2007 年完成国家北方区域试验全部试验程序,2008 年初通过国家审定。

1.1.2 供试肥料

供试磷肥为磷酸二铵,其中 P_2O_5 含量为 46%,N 含量为 18%。

1.2 试验地点

试验于 2008 年 6 月—10 月在九台市饮马河镇莲花村农场进行。该农场位于吉林省中部,长白山与松辽平原过渡地带(44°20' N, 126°15' E)。属中温带

大陆季风性气候。年平均气温 4.7 ℃,每年大于 10 ℃ 活动积温 2 880 ℃,年平均降水量 577 mm。试验田为种植水稻 30 a 以上的老稻田,土壤为中性黑土,前茬均为水稻。土壤的主要理化性质见表 1。

表 1 土壤主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical characteristic of soil samples

pH	全氮/ $g \cdot kg^{-1}$	全磷/ $g \cdot kg^{-1}$	速效磷/ $g \cdot kg^{-1}$	全钾/ $g \cdot kg^{-1}$	有机质/ $g \cdot kg^{-1}$	CEC/ $cmol \cdot kg^{-1}$
6.67	1.93	0.19	0.009 9	0.47	14.73	25.32

1.3 研究方法

1.3.1 试验设计

试验根据磷肥用量设计 5 个处理,4 次重复,小区面积 20 m²,随机区组排列。各处理为:T1(CK),不施磷肥;T2, P_2O_5 40 kg·hm⁻²;T3, P_2O_5 80 kg·hm⁻²;T4, P_2O_5 120 kg·hm⁻²;T5, P_2O_5 150 kg·hm⁻²。各处理磷肥均作基肥。氮肥和钾肥的施用量与本地常规种植相同,施尿素(N)225 kg·hm⁻²和氯化钾(K_2O)90 kg·hm⁻²。各小区间筑土埂,用塑料薄膜包埂,以防肥水灌串。在分蘖期、拔节期、孕穗期和成熟期取土样和植株。水稻植株用蒸馏水冲洗,按根、茎、叶和籽粒分解开,杀青、烘干后称量,然后粉碎装于塑封袋备用。

1.3.2 测定方法

土壤、磷肥和植株样品分别经浓 HNO_3 和浓 $HClO_4$ 消化后,用石墨炉(型号 UN I2CAM GF90 plus furnace)测定重金属 Cd 含量,用原子吸收分光光度计(型号 UN ICAMSOLAAR 989)测定重金属 Pb 含量。

土壤的理化性状和肥力状况用常规方法测定。

2 结果与分析

2.1 土壤及磷肥的重金属背景值

由试验点土壤理化性质(表 1)可以看出,土壤为弱酸性,土壤有机质含量较低,为 1.47%。由表 2 可见,磷肥和土壤样品中,Cd 和 Pb 含量分别高于土壤中重金属含量 40.0%和 5.32%。磷肥和土壤中 2 种重金属元素含量都在国家土壤环境质量二级标准范围内。

表 2 土壤和磷肥重金属背景值

Table 2 Background values of soil and phosphorus fertilizer

样品	重金属含量/ $mg \cdot kg^{-1}$	
	Cd	Pb
磷酸二铵	0.35	3.17
土壤	0.25	3.01
土壤环境质量国家标准(二级)	0.60	300.0

2.2 不同磷肥处理土壤-水稻系统中重金属的空间分布

从表 3 可以看出, 磷肥的 5 种处理中,Cd 和 Pb 在土壤中被水稻吸收以后,主要集中在根部,只有少量向水稻植株地上部分(根、叶、茎和籽粒)迁移,剩余部分滞留在土壤中。重金属在水稻不同器官的含量分布顺序为 Cd:根>籽粒>叶>茎;Pb:根>叶>籽粒>茎。即重金属在水稻植株体内的分布规律是新陈代谢旺盛的器官内蓄积量较大,在营养器官内蓄积量较少。磷肥处理中,根、茎和籽粒中 Cd 含量均与对照达到极显著差异,土壤中 T2 和 T3 处理 Cd 含量与对照差异不显著,叶片中 T2 处理与对照差异不显著;土壤和水稻植株各器官 Pb 含量均与对照达到极显著差异,叶片中 T3、T4 和 T5 处理间 Pb 含量达到显著水平,籽粒中 T4 和 T5 处理 Pb 含量差异不显著。

2.3 不同磷肥浓度下重金属累积的季节变化

从图 1 和图 2 可以看出, 重金属 Cd 和 Pb 在水稻各器官的变化规律是有很大差异的。水稻根部重金属含量在 7 月和 8 月(即分蘖期和拔节期)较低,而在 9 月和 10 月(孕穗期和成熟期)根部积累的重金属含量迅速上升,并达到最大值。对于水稻叶片,累积的重金属在 7 月较高,然后逐渐降低,到 8 月中旬时降到最低值,然后重金属积累逐渐增加,到 10 月达到最大。重金属在水稻茎部的累积规律与叶片相反,重金属含量在 8 月较低,然后随水稻生长逐渐增加,9 月达到最大值,然后随水稻的发育成熟逐渐呈下降趋势。水稻籽粒重金属含量随时间累积的变化规律比较明显,从 8 月孕穗开始直到成熟,重金属累积一直增加,10 月达到最大值。2 种重金属在水稻各器官的累积随时间的动态变化规律基本一致,并且施磷肥的不

同处理在水稻的各个时期重金属累积均高于对照。

2.4 重金属在土壤-水稻系统中的迁移规律

重金属在植物中的迁移规律用重金属的吸收富集系数来表征。所谓吸收富集系数就是指重金属在植物各个器官累积的质量分数与土壤中对应的重金属累积质量分数之比^[1]。吸收富集系数越大,表示重金属在植物体中迁移能力越强^[2]。本研究中,水稻各器官吸收富集系数如表 4 所示。重金属 Cd 在水稻各器官的迁移能力为根>籽粒>叶>茎, 重金属 Pb 在水稻各器官的迁移能力为根>叶>籽粒>茎。对重金属 Cd 在水稻各器官的迁移能力分析中,除吸收重金属能力很强的根部外,籽粒吸收富集重金属的能力排在第二位,明显强于叶和茎,这也正好能够解释为什么在世界范围内,会导致众多“镉米”中毒事件发生。重金属

表 4 水稻植株部位对重金属的吸收富集系数
Table 4 The enrichment coefficients of heavy metal in different parts of rice plant

重金属	处理	富集系数			
		根	叶	茎	籽粒
Cd	T5	1.13(0.11)	0.56(0.06)	0.30(0.01)	0.70(0.05)
	T4	1.46(0.15)	0.58(0.03)	0.32(0.06)	0.82(0.07)
	T3	1.56(0.21)	0.58(0.04)	0.33(0.05)	0.79(0.04)
	T2	1.00(0.07)	0.38(0.01)	0.28(0.02)	0.51(0.05)
	T1(CK)	0.74(0.02)	0.35(0.03)	0.15(0.01)	0.42(0.02)
Pb	T5	2.50(0.41)	0.48(0.01)	0.26(0.03)	0.44(0.03)
	T4	2.48(0.33)	0.47(0.11)	0.20(0.01)	0.43(0.02)
	T3	1.65(0.17)	0.44(0.07)	0.18(0.01)	0.36(0.07)
	T2	1.56(0.15)	0.41(0.03)	0.11(0.03)	0.33(0.05)
	T1(CK)	1.46(0.12)	0.36(0.02)	0.06(0.01)	0.27(0.02)

注:表中为水稻成熟期数据,括号内为标准误。

表 3 重金属在土壤-水稻系统中的空间分布
Table 3 Spatial distribution of heavy metal in soil-rice system

重金属	样品	重金属含量/mg·kg ⁻¹				
		T5	T4	T3	T2	T1(CK)
Cd	土壤	0.356(0.02)aA	0.265(0.07)bB	0.257(0.11)cB	0.243(0.04)cB	0.238(0.07)cB
	根	0.403(0.08)aA	0.387(0.02)aA	0.384(0.09)aA	0.244(0.09)bB	0.176(0.05)cC
	叶	0.200(0.01)aA	0.153(0.04)bB	0.143(0.03)bB	0.093(0.01)cC	0.084(0.06)cC
	茎	0.105(0.01)aA	0.084(0.006)bB	0.082(0.01)bB	0.067(0.009)cC	0.035(0.03)dD
	籽粒	0.250(0.03)aA	0.217(0.15)bB	0.194(0.17)cB	0.123(0.01)dC	0.100(0.07)eC
Pb	土壤	4.344(0.18)aA	4.093(0.17)bAB	3.993(0.27)bBC	3.747(0.25)cC	3.100(0.28)dD
	根	10.883(0.81)aA	10.144(0.72)bB	6.601(0.82)cC	5.849(0.54)dD	4.521(0.49)eE
	叶	2.073(0.13)aA	1.943(0.12)abA	1.770(0.33)bcA	1.536(0.11)cB	1.130(0.15)dC
	茎	1.150(0.07)aA	0.825(0.05)bB	0.700(0.12)cB	0.420(0.08)dC	0.180(0.02)eD
	籽粒	1.93(0.11)aA	1.79(0.10)aA	1.44(0.20)bB	1.23(0.07)cC	0.83(0.03)dD

注:每行小写字母和大写字母分别表示 α<0.05 和 α<0.01 显著水平,括号内为标准误(n=3)。表中数据为水稻成熟期数据。

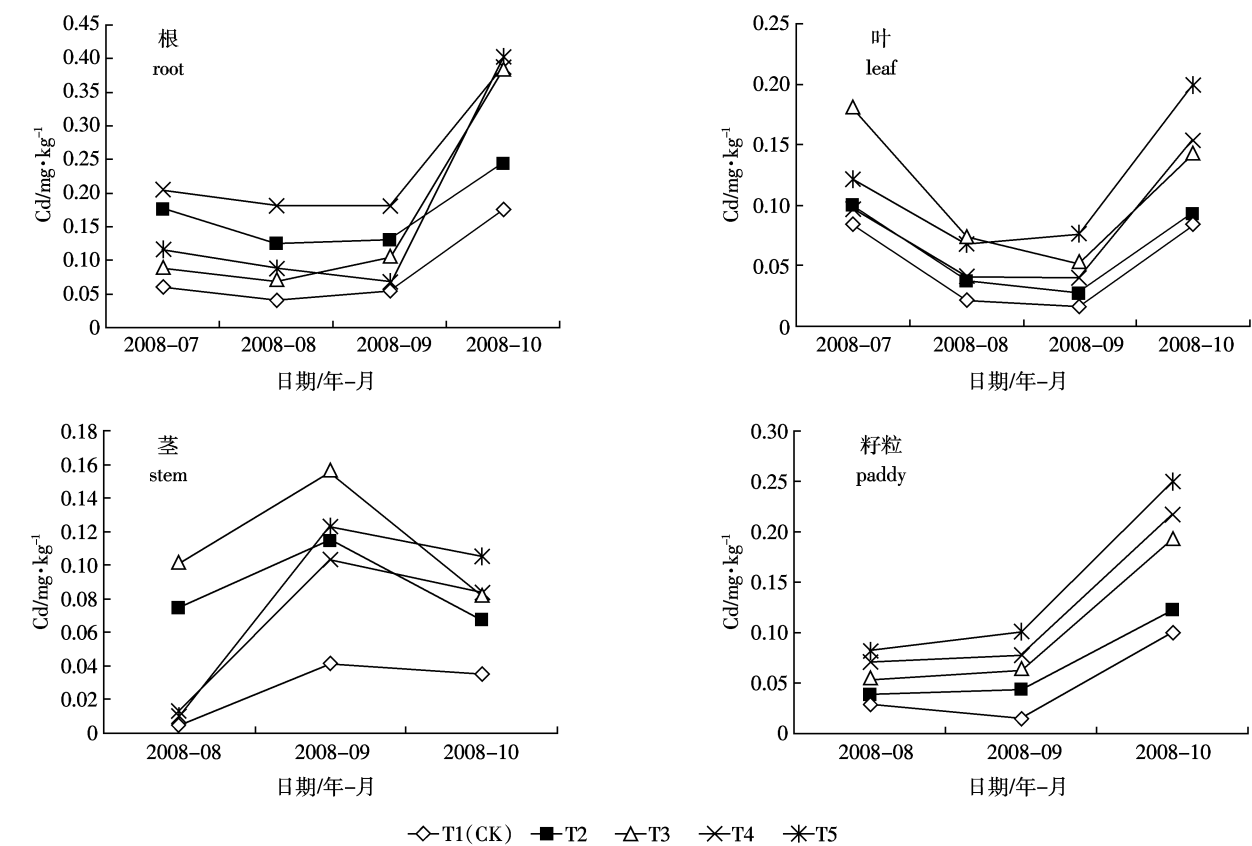


图 1 重金属 Cd 在水稻植株中的季节变化
Figure 1 Seasonal changes of heavy metal Cd in rice plant

Pb 从土壤中向籽粒迁移的能力明显要弱于 Cd 元素,排在第三位,仅强于其在茎中的迁移能力。对 2 种重金属在水稻中的迁移能力比较显示,除在根中重金属 Cd 的富集能力低于 Pb 外,Cd 在水稻地上部分的迁移能力要明显强于 Pb。磷肥的各种浓度处理中,2 种重金属在水稻中的迁移能力均明显强于对照。

2.5 土壤-水稻系统重金属含量与磷肥施用浓度的关系

磷肥施用量和重金属含量的关系可用线性回归方程来模拟,线性方程和相关系数如表 5 所示。可以看出,重金属含量与磷肥施用量呈直线正相关关系。2 种重金属在土壤-水稻系统中的累积量与磷肥施用浓度关系的显著性检验中,除根中重金属 Cd 的含量与磷肥施用浓度达到 0.05 显著水平外,其余均达到 0.01 显著水平。表 5 说明,水稻施用磷肥量的增加能显著增强重金属在土壤-水稻系统的累积,并且磷肥施用量与重金属 Pb 的累积量的相关性高于重金属 Cd。因此,水稻栽培生产中过量使用磷肥,能产生重金属对土壤和稻米的污染,进一步导致重金属对人畜健康的潜在威胁。

3 讨论

现代农业粮食生产中,磷肥的施用是造成土壤-作物系统重金属污染、环境恶化的主要因素之一。化肥中的重金属通常比土壤中的重金属有较高的可溶性,容易被作物吸收,危害更大^[13]。本研究施用的磷肥

表 5 重金属含量与磷肥施用量的关系
Table 5 The relationships between heavy metal content and the dosages of phosphorus fertilizer

重金属	土壤-水稻系统	回归方程	相关系数
Cd	土壤	$y=0.15x+0.22$	0.63**
	根	$y=0.80x+0.91$	0.39*
	叶	$y=0.66x+0.29$	0.80**
	茎	$y=0.25x+0.19$	0.80**
	籽粒	$y=0.90x+0.36$	0.90**
Pb	土壤	$y=1.72x+3.23$	0.91**
	根	$y=10.29x+4.12$	0.94**
	叶	$y=1.40x+1.22$	0.96**
	茎	$y=1.41x+0.18$	0.98**
	籽粒	$y=1.68x+0.88$	0.99**

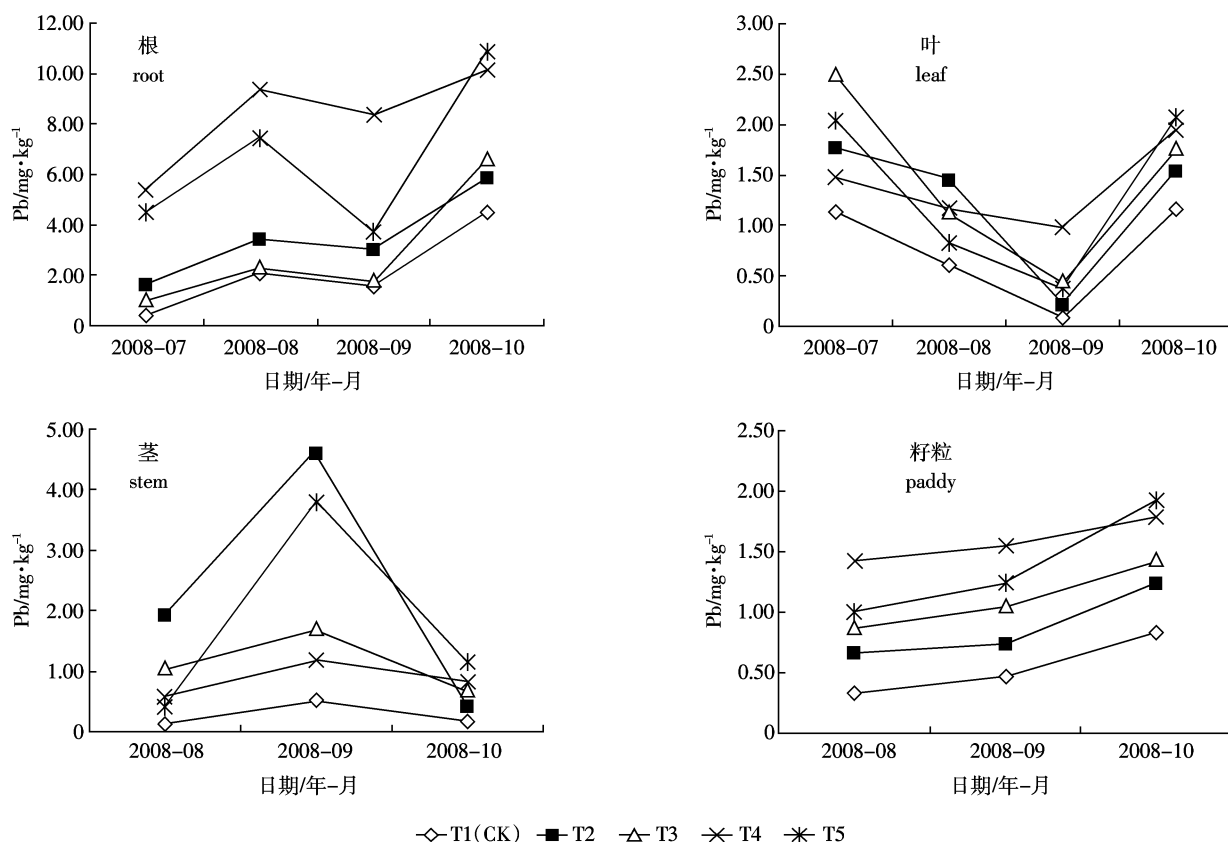


图 2 重金属 Pb 在水稻植株中的季节变化

Figure 2 Seasonal changes of heavy metal Pb in rice plant

中重金属 Cd 和 Pb 的背景值高于土壤的背景值,施入水稻田中后容易引起土壤-水稻系统的污染^[14-15]。水稻吸收重金属的主要器官是根,Qian 等在研究湿地植物的微量元素吸收时亦指出,As、Cd、Pb、Hg 等在湿地植物根系中的浓度要达到嫩枝中浓度的 5~60 倍^[16]。研究结果显示,水稻根部重金属蓄积量很高,有一部分重金属滞留在土壤里,少量向地上部分迁移,重金属在水稻不同器官的含量分布顺序为 Cd:根>籽粒>叶>茎;Pb:根>叶>籽粒>茎。根中重金属含量高于地上部分的研究结果与莫争等^[11]和关公湊等^[12]研究结果基本一致,即重金属在植物新陈代谢旺盛的根部含量较高,在营养储存器官含量较小。也有研究者提出植物地上部分的重金属含量顺序和本研究略有差异,李云等^[17]通过盆栽试验研究茶苗对重金属的吸收累积规律,认为重金属 Cd 和 Pb 在茶苗中的分布顺序为根>茎>叶。

上述研究中共同点是重金属在植物根中累积量最高^[17]。因此,有研究者^[18]认为,重金属之所以在植物根部含量较高可能与重金属进入根的皮肤细胞后和根内蛋白质、多糖类、核酸等化合成为稳定的大分子

络合物或不稳性有机大分子而沉积有关。本研究结果与前述研究结果产生差异的是籽粒中重金属 Cd 含量高于地上部分其他器官,即在本区域内 Cd 更容易在水稻籽粒中富集。因此可以简单预测,重金属 Cd 富集到一定阈值时,对该区域产生的潜在危害更严重,产生这种现象的机理还有待于进一步探讨。

重金属在土壤-水稻系统中的迁移、分布随时间发生变化,是一个动态过程^[9]。在水稻的生育期中,根部和地上部分重金属积累在分蘖期达到最大,在其他生育期逐渐降低,秧苗期最低^[12],并认为导致这种现象的原因为根部和茎部在分蘖期生长代谢旺盛,使重金属通过土壤和根不断向地上部分迁移,随根部化学性状的变化以及原生质分泌^[20]和茎部代谢机制减弱,根和茎吸收的重金属逐渐减少。严明理等研究超富集植物对重金属的吸收、富集规律时也认为,富集植物吸收的 Cd 在体内的分布有两种情况,一种是大部分累积在根部,另一种是把根系吸收的 Cd 大部分运输到地上部^[21]。本文的研究结果则呈现一定的差异,不同浓度磷肥处理重金属在水稻根、叶和籽粒中均是在成熟期累积达到最大,其他生育期则较小,叶累积重

金属的动态变化正好与上述器官相反。本研究中出现差异可能与试验的季节、土壤 pH 值和阳离子交换率、环境温度、供试品种等因素不同有关。目前对施磷肥导致土壤-水稻系统重金属累积分布的研究还很少,仅有的研究报道也不够深入。依艳丽等^[22]研究重金属 Zn、Cd 污染对土壤中速效磷的影响时指出,在短时间内,Cd 使土壤速效磷含量升高,但随时间增长则转变为 Cd 使土壤速效磷含量降低,Zn、Cd 复合污染也使速效磷含量降低^[22]。引起根、茎、叶及籽粒中重金属含量明显差异的生理生化机制以及磷和重金属元素的协同或者拮抗作用还有待进一步研究。

4 结论

(1)施用磷肥对重金属 Cd 和 Pb 在土壤-水稻系统分布有一定影响,新陈代谢旺盛的根部累积量较大,而在营养贮存的地上部分累积量较少。

(2)重金属 Cd 和 Pb 在水稻地下和地上部分的累积量随生育期变化而变化,根、叶和籽粒的累积量均在成熟期达到最大。Cd 在籽粒中的迁移富集能力仅次于根,这也可能是导致“镉米”中毒发生的直接原因。

(3)重金属累积量与施用磷肥浓度呈正相关,如过量施用将导致土壤和水稻植株重金属 Cd 和 Pb 含量升高,产生重金属对土壤和稻米的污染,进而导致重金属对人畜健康的潜在威胁。

参考文献:

- [1] 王庆仁,李继云.论合理施肥与土壤环境的可持续发展[J].环境科学进展,1999,7(2):116-124.
WANG Qing-ren, LI Ji-yun. Fertilizer proper use and sustainable development soil environment in China[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(2): 116-124.
- [2] 李森照,罗金发.中国的污水灌溉和环境质量控制[M].北京:气象出版社,1995.
LI Sen-zhao, LUO Jin-fa. Sewage irrigation and environmental quality control of China[M]. Beijing: Meteorological Press, 1995.
- [3] 朱喜峰,邹定辉,简建波,等.龙须菜对重金属铜胁迫的生理反应[J].应用生态学报,2009(6):1438-1444.
ZHU Xi-feng, ZOU Ding-hui, JIAN Jian-bo, et al. Physiological responses of *Gracilaria lemaneiformis* to copper stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009(6): 1438-1444.
- [4] 肖美秀,梁义元,梁康迳,等.水稻重金属污染及其控制技术的研究进展[J].亚热带农业研究,2005,1(3):40-43.
XIAO Mei-xiu, LIANG Yi-yuan, LIANG Kang-jing, et al. Advance in research on pollution of heavy metals in rice and its control technology [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2005, 1(3): 40-43.
- [5] 郑良永.农业施肥与生态环境[J].热带农业科学,2004,24(5):79-84.
ZHENG Liang-yong. Fertilizer application and ecology environment[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2004, 24(5): 79-84.
- [6] Torbert H A, Daniel T C, Lemunyon, et al. Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and non-calcareous soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 1380-1387.
- [7] 高阳俊,张乃明.施用磷肥对环境的影响探讨[J].中国农学通报,2003,19(6):162-165.
GAO Yang-jun, ZHANG Nai-ming. Studying on the influence of phosphorus fertilizer on environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(6): 162-165.
- [8] Zhang M K, He Z L, Stoffella P J, et al. Solubility of phosphorus and heavy metals in potting media amended with yard waste-biosolids compost[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 373-379.
- [9] Chien S H, Carmona G, Prochnow L I, et al. Cadmium availability from granulated and bulk-blended phosphate-potassium fertilizers [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 1911-1914.
- [10] Zhu Y G, Smith S E, Smith F A. Zinc(Zn)-phosphorus(P) interactions in two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) differing in P uptake efficiency[J]. *ANN Bot*, 2001, 88: 941-945.
- [11] 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.
MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in rice plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2): 110-116.
- [12] 关公凑,徐颂,黄金国.重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J].生态环境,2006,15(2):315-318.
GUAN Gong-ou, XU Song, HUANG Jin-guo. The regularity of distribution, change and migration of heavy metals in soil-rice plant system [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 315-318.
- [13] 周永峰,刘兴成,周艳琳.肥料中重金属含量及其对干旱灌溉农区玉米吸收积累的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):503-506.
ZHOU Yong-feng, LIU Xing-cheng, ZHOU Yan-lin. Contents of heavy metals in fertilizers and their accumulation in corn arid agriculture with irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(suppl): 503-506.
- [14] Pieri L A D, Buckley W T, Kowalenko C G. Cadmium and lead concentrations of commercially grown vegetables and of soils in the Lower Fraser valley of British Columbia[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1997, 77(1): 51-57.
- [15] Camelo L G L D, Miguez S R D, Marban L. Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 204(3): 245-250.
- [16] Qian J H, Zayed A, Zhu Y L. Phytoaccumulation of trace elements by wet land plants: III. Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species[J]. *Journal of Environment Quality*, 1999, 28: 1448-1455.
- [17] 李云,张进忠,童华荣.茶苗对重金属 Pb Cu Cd 和 Cr 的吸收规

- 律[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):454-459.
- LI Yun, ZHANG Jin-zhong, TONG Hua-rong. Absorption and accumulation of Cr, Pb, Cu and Cd in young tea tree[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):454-459.
- [18] 王焕校. 污染生态学基础[M]. 昆明:云南大学出版社, 1990:71-148.
- WANG Huan-xiao. Basic of pollution ecology [M]. Kunming: Yunnan University Press, 1990:71-148.
- [19] 邴逸根, 薛生国, 吴小勇. 重金属在土壤-水稻系统中的迁移转化规律研究[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊):87-92.
- LI Yi-gen, XUE Sheng-guo, WU Xiao-yong. Transport and transformation of heavy metals in the soil-paddy plant system[J]. *Geology in China*, 2004, 31(suppl):87-92.
- [20] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 2001:217-219.
- DAI Shu-gui. Environmental chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001:217-219.
- [21] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 等. 3种植物对红壤中镉的富集特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):72-77.
- YAN Ming-li, LIU Li-li, WANG Hai-hua, et al. Accumulation characteristics of cadmium for three plants in red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):72-77.
- [22] 依艳丽, 周咏春, 张大庚, 等. 重金属(Zn、Cd)污染对土壤中速效磷的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(3):668-672.
- YI Yan-li, ZHOU Yong-chun, ZHANG Da-geng, et al. Effect of heavy metal (Zn, Cd) pollution on available P in the soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(3):668-672.

致谢: 承蒙西弗吉尼亚大学 Dr. Jingxin Wang 对本文英文部分的修改指正和中国农业科学院邓春生研究员对实验方案的指导, 特此深表感谢!