

镉在水稻体内的分布及其影响因素

熊礼明 鲁如坤

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

研究了添加Cd的红壤上盆栽水稻对土壤Cd的吸收及在植株体内的分布。发现添加可溶性磷酸盐促进了Cd从根系向地上部的转移,而石灰则抑制Cd向地上部的转运。植株体内磷酸根离子可能有助于Cd在植物体内的运输。

控制污染土壤中的镉(Cd)从植物渠道进入食物链的途径有两条:一是控制植物对土壤Cd的吸收;另一途径是控制已进入植物体内的Cd向食用部分(如籽实)的转移和积累。目前关于Cd污染的控制研究都集中在降低污染土壤中Cd的有效性,很少有人研究控制植物体内Cd的转移以达到降低食用部分Cd含量的目的。本文研究了在淹水红壤上添加Cd后,水稻吸收的Cd在籽实、茎叶与根之间的分布,并初步探讨了施用石灰、磷肥等对Cd在植物体内转运与分布的影响及其机理。

一、材料与方法

(一)供试土壤 采自江西省鹰潭市的红壤。母质为第四纪红色沉积物。土壤pH4.73;有机质7.0g/kg;速效磷(P)3.0mg/kg(0.5mol/L NaHCO₃法);粘粒含量471g/kg;全Cd含量0.118mg/kg土。

(二)添加Cd处理 设4个Cd水平,Cd的总添加量分别为0(对照),3,8,16mg/kg土,以3CdSO₄·8H₂O(分析试剂)溶液加入土壤中,充分混匀。

(三)磷酸盐处理 设3个磷水平,磷(P)的总添加量分别为50,150,300mg/kg土,以Ca(H₂PO₄)₂·2H₂O(化学试剂)形式加入土壤中。

(四)石灰处理 磷(P)水平为150mg/kg土,在上述4种Cd水平下进行盆栽试验。设3个石灰水平:0(不施),2.5g/盆和7.5g/盆(相当于添加0.083%和0.25%的石灰)。石灰以CaCO₃(分析试剂)粉末状加入土壤中,充分混匀。石灰与土壤反应达平衡后的pH分别为4.8(未加石灰),5.3和6.0左右。

(五)盆栽试验 每盆装土3kg,所有处理均3次重复。在进行水稻盆栽之前,上述土壤上已做过两次短期的盆栽试验(小麦和黑麦草苗期试验),二者从土壤中摄取的Cd和P均不及加入量的1%,故忽略不计,所有盆钵均提供相同浓度的N、K、Mg等营养元素。淹水后每盆播稻种(协菲11号,杂交稻)3穴,每穴出苗后保留2株。分蘖期追施Zn 5mg/kg土(ZnSO₄·H₂O),生长期内追施一次氮肥,全生育期淹灌。收获后按穗、茎叶烘干称重。手工剥去谷壳,称糙米重,并粉碎备用。地上部收获后,从盆钵中取出根系,小心清洗后烘干、称重、磨细备用。

(六)植株分析 样品经HNO₃消化后,用原子吸收分光光度法测定Cd的浓度。未添加Cd

处理用石墨炉法, 添加 Cd 处理的样品用火焰法。磷的含量用钼蓝比色法测定。数据经方差分析后, 用 Duncan 新复极差法对平均值进行比较。平均值后有相同字母者在 5% 水平上差异不显著。

二、试验结果

(一) 不同 Cd、磷水平下植株体内的 Cd 分布

本文中 Cd 在植株体内的分布以器官含 Cd 总量占全株含 Cd 总量 (吸 Cd 量) 的百分比表示。所以了解 Cd 的分布必须首先了解各部分干重和 Cd 含量 (表 1)。据这些结果可以计算出 Cd 在植株体内的分布 (表 2)。

表1 磷酸盐对水稻各部分干物重和含Cd量的影响

添加Cd量 ($\mu\text{g/g}\pm$)	磷水平 ($\text{P}\mu\text{g/g}\pm$)	糙 米		茎 叶		根 系	
		干 重 (g/盆)	含Cd量 ($\mu\text{g/g}$)	干 重 (g/盆)	含Cd量 ($\mu\text{g/g}$)	干重 (g/盆)	含Cd量 ($\mu\text{g/g}$)
0	50	14.77bc	0.027	48.95b	0.121d	13.58a	5.14e
	150	23.02a	0.008	62.06a	0.129d	11.03a	6.03e
	300	17.43ab	0.015	49.51b	0.138d	10.09a	5.85e
2	50	10.87cd	0.263	34.14c	14.48cd	9.75ab	138.73c
	150	18.35ab	0.790	54.97ab	30.31bc	12.01a	60.71d
	300	18.97ab	0.897	51.50b	28.38bc	12.16a	47.24de
8	50	4.28cf	2.17(2*)	20.99d	21.60bc	6.1b	386.6a
	150	18.42ab	1.25	51.02b	28.64bc	12.02a	221.5b
	300	17.4bab	0.802	50.73b	36.69abc	10.57a	191.07b
16	50	0.67f	1.97(1)	6.99e	53.36a	2.52c	434.7a
	150	8.43dc	1.67	45.01b	28.57bc	9.8ab	434.8a
	300	18.89ab	2.23	54.91ab	42.47ab	10.47ab	434.1a

* 为糙米产量的重复数, 未注明者均为 3。

表2 不同添加Cd及不同磷水平下 Cd 在水稻体内的分布

添加 Cd 量 ($\mu\text{g/g}\pm$)	磷 水 平 ($\text{P}\mu\text{g/g}\pm$)	总吸 Cd 量 ($\mu\text{g/g}$)	Cd 的 分 布 (%)			茎叶干重/根干重 (S/R)
			糙米	茎叶	根系	
0	50	75.8	0.5	8.3	91.2	3.64cde
	150	74.8	0.2	10.8	88.9	5.62a
	300	70.5	0.2	9.7	90.1	4.95abc
2	50	1839.3	0.2	26.9	73.0	3.58cde
	150	2366.2	0.6	69.5	29.9	4.66abc
	300	2046.4	0.8	71.3	27.9	4.50abcd
8	50	2554.3	0.2	10.4	85.8	3.26de
	150	4116.7	0.6	35.1	64.4	4.37abcd
	300	3943.9	0.4	47.1	52.6	4.94abc
16	50	1354.1	0.1	17.1	82.8	2.74e
	150	5562.7	0.2	23.1	76.7	4.60abcd
	300	6913.9	0.6	33.7	65.8	5.26ab

从表2中可以看出,未添加Cd时,植株所吸收的微量的来自土壤中的Cd,90%左右都滞留在根中,10%左右分布在茎叶中,进入籽实中的很少,仅占0.2%左右。但添加Cd以后,植株所吸收的Cd保留于根中的比例减少,均低于90%,而分布在茎叶(稻草)中的比例增加,进入籽实中的比例与未添加Cd(本底)的植株在绝对值上相差不大,但相对的变异较大。因此,总的来说,土壤含Cd量增加后,植物所吸收的Cd向地上部转移的比率升高。这并不是因干重变化而引起的(表1),而是Cd在植株体内的转移能力提高所致。

在未添加Cd的土壤中,磷水平对Cd在植株体内的分布无明显影响。添加Cd以后,在同等磷水平下,根部Cd的分配比例随添加Cd水平的升高而升高,而茎叶中则相反,进入糙米中的Cd也有所下降。说明由于添加Cd水平的升高,更多的Cd积累在根中,而Cd向地上部的转移随之减少。

但在同一添加Cd水平下,随着磷水平的升高,根系中Cd的分配比例降低,而进入茎叶和糙米中的Cd明显增加。这有两方面的原因:一是磷对地上部生长的促进作用大于对根系的促进作用(表2中的S/R比),地上部含Cd的绝对量升高;另一重要原因是,随着磷水平的升高,地上部Cd的含量(浓度)提高了,这说明磷促进了Cd向地上部的转运。当然,地上部Cd含量的提高部分是由于从土壤中吸收的Cd增加所致^[1],但是,将植株总生物量与吸Cd总量比较后可知,全株单位干重平均吸Cd量(即全株平均浓度)随磷水平升高而降低,因此,磷水平的升高并未导致单位植株干重摄Cd量的增加,所以地上部Cd分配的比例增加,主要是磷促进了植株体内Cd从根系向上的转移所致。

(二)施用石灰对植株体内Cd分布的影响

施石灰后,可能是因为诱导了植株缺Zn,结果植株干物重降低。地上部和根受石灰抑制的程度相似。施石灰后,淹水土壤中Cd由交换态向络合态转化,Cd的有效性降低^[2]。但地上部含Cd量下降亦还有其它原因。

从表3中可以看出,未添加Cd时,石灰对Cd在植株体内的分布无明显影响。添加Cd以后,根部Cd分配的比例下降。同等石灰水平下,随着添加Cd量的升高,根部Cd的分配比例增加,而向地上部转移的比例减少。这与前面的结果一致(表2)。

但在同等Cd水平下,与磷酸盐的影响相反,随着石灰用量的升高,Cd在根中的比例增

表3 不同Cd添加量及石灰用量下Cd在水稻体内的分布

Cd水平($\mu\text{g/g土}$)	石灰用量 (g/盆)	全株吸Cd ($\mu\text{g/盆}$)	根含Cd量 ($\mu\text{g/g}$)	Cd的分布(%)			
				根	茎叶	糙米	
0	0	74.8	6.03d	88.8	10.8	0.3	
	2.5	119.6	8.34d	93.5	6.3	0.2	
	7.5	74.2	6.81d	93.1	6.3	0.5	
2	0	2368.0	60.31d	29.9	69.5	0.6	
	2.5	2311.9	85.12d	46.3	53.3	0.4	
	7.5	852.8	65.94d	58.7	40.5	0.8	
8	0	4116.7	221.5c	64.4	35.1	0.6	
	2.5	3012.6	250.2c	65.0	34.6	0.4	
	7.5	3198.2	369.4ab	72.6	27.0	0.5	
16	0	5561.5	434.8a	76.7	23.1	0.2	
	2.5	4094.4	301.0dc	82.9	16.8	0.3	
	7.5	4518.5	447.0a	83.7	16.1	0.2	

加,而在地上部的比例降低,这亦由两方面的原因引起,一是地上部受石灰的影响干重降低;另一原因是地上部含Cd量下降。由于根系亦受石灰的抑制,所以地上部Cd含量降低是导致Cd在在地上部比例降低的主要原因。因此,施石灰降低地上部Cd含量,并不仅仅是由于土壤有效Cd降低使植物吸Cd量下降,CaCO₃处理使Cd在植物体内的运转受阻亦是很重要的原因。

(三)植物体内Cd的分布与P转运的关系

上述结果说明,Cd在植物体内的分布除与各器官生物量有关外,更主要的还是与Cd在体内的转运有关,即更取决于Cd在器官内的浓度。试验中发现,添加Cd若引起植株生物量显著降低,则植株体内含P量也将受到显著影响。在磷酸盐对Cd分布影响的试验中,发现糙米中含Cd量与含P量有极显著相关($r=0.653^{**}$, $n=24$)。实际上,在同等供P时,石灰对Cd分布影响的试验中,施石灰各处理的稻米中Cd含量同P含量亦有极显著的相关($r=0.719^{**}$, $n=27$),而在根中,则没有这种关系。不管供P水平高低,施石灰与否,将所有添加Cd处理稻米中Cd的含量与P含量进行相关分析,表明二者仍具有极显著的相关性($r=0.667^{**}$, $n=42$) (图1)。因此,植物体内P与Cd可能存在某种协同关系。

三、讨 论

同其它重金属相比,Cd在土壤中的有效性较高,进入植物体后向地上部的转运能力也比大多数重金属强。试验表明,当土壤首先遭受外来污染时,Cd向地上部的转移加强,但随着Cd污染程度的加深,植物所吸收的Cd更多地保留于根中,向地上部的转运减少。因此,Cd在植物体内的转运对控制Cd在器官间的分布是至关重要的。

图1表明,所有添加Cd处理糙米中Cd的含量与P的含量有极显著的相关。磷酸根是植物体内具有络合能力的最重要的无机阴离子。在植物生长盛期,根系吸收的磷大量向地上部运输,老叶中的磷也不断向新叶运输,成熟期磷则从茎叶中向籽实运输。这些长距离运输中P的形态主要是无机态^[3,4]。本试验中发现的一系列现象,如P促进了Cd的吸收及向茎叶,稻米中的转移,添加磷降低根中Cd的含量却提高茎叶、籽实含Cd量,二者具有极显著的相关关系,这说明在植物体内P的运转可能带动了Cd的运转,二者有可能以CdHPO₄[°](或CdH₂PO₄⁺)等形态在植物体内运输。例如,假设植物体内可溶态P60%为无机磷,设植物体内pH为中性,不考虑其它配位离子的影响,则CdHPO₄[°]形态可占总Cd的36%左右。这一无机络合物的分子半径不大,又不带电荷,在植物体内被吸附的能力比Cd²⁺要弱得多,因而相对较容易进行长距离运输,以至明显增加茎叶和籽实中Cd(和P)的含量,并且其向地上部的加速运转可能也有利于根系对这些元素的进一步吸收。由于在P供应过量时,植株体内净增加的P主要是无机态P,大量吸收的无机态P可能与Cd²⁺形成CdHPO₄[°]络合物而促进Cd的运转,甚至进入液泡中分隔,从而使游离态Cd²⁺降低,减轻Cd²⁺的毒害作用,提高植物对Cd的抗性,考虑到植物体内的pH环境和基质浓度,一般不大可能形成Cd₃(PO₄)₂沉淀或其它络合物。

(下转第145页)

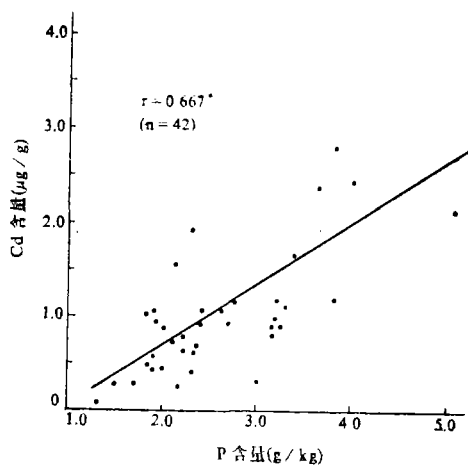


图1 稻米中含Cd量与含P量的关系

综上所述,可以看出,土壤水分长时期处于亏缺状态,不利于植物的生长,但对菌丝的发育和侵染的影响并不十分严重,菌根菌接种增加了植物的抗旱能力。三叶草本身并不因为短时期土壤含水量过高而影响生长,但是土壤含水量过高所造成的土壤通气不良,使好气性菌根真菌的发育受到了抑制。(参考文献略)

表2

不同水分下接种菌根菌对植物体内氮磷含量的影响

(苗龄70天)

占田间持水量的%	植株体内的氮、磷含量(毫克/株)					
	P			N		
	M	-M	M比-M 增加%	M	-M	M比-M 增加%
20	12.7**	9.94	28	153**	103	49
40	43.3**	38.4	13	522**	361	45
60	64.4**	49.0	32	623**	432	44
80	78.1**	62.4	25	792**	561	41
渍水	26.3*	22.1	19	345**	278	24
30 天 后 处 理						
20	15.0**	8.7	73	174**	104	67
60	58.7**	31.4	87	642**	277	132
渍水	23.7*	22.9	3	328*	230	43

注: T检验; * 显著差异($P < 0.05$); ** 极显著差异($P < 0.01$)。

(上接第 141 页)

施石灰处理的籽实中含P量与含Cd量也有显著的正相关,可能与石灰对土壤P的有效性影响有关,也可能有其它原因。Carlson和Ragsdale(1988)^[5]发现东部白松在正常pH值时Cd的分布是根>>茎>针叶,而在低pH(2)时则根系、茎、针叶基本相同,茎叶中Cd, Zn含量显著升高。这同本试验结果有某种类似(表3)。他们认为,低pH时不正常的分布是根系损伤造成的。但又如何影响到植物体内的运转目前仍很难说清楚。

参 考 文 献

- [1] Xiong Liming and Lu Rukun. Pedosphere. 1: 63-72. 1991.
- [2] Xiong Liming and Lu Rukun. Environ. Pollut. (in press). 1992.
- [3] Bielecki, R. L. Ann. Rev. Plant Physiol. 24: 225-252. 1973.
- [4] Bielecki, R. L. and Ferguson, I. B. Encyclopedia of Plant Physiology. Vol. 15A. Inorganic Plant Nutrition (ed. by A. Lauchi and R. L. Bielecki). 422-449. Springer-verlag, Berlin. 1983.
- [5] Carlson, C. L. and Ragsdale, H. L. Water, Air, and Soil Pollut. 42: 329-339. 1988.