

水稻中重金属的含量及其富集因素的探讨*

穆从如 夏增禄 李森照 沈瑞珍
孟维奇 何瑞珍

(中国科学院地理所, 北京)

摘 要

采集我国12种土壤, 进行盆栽水稻试验, 结果表明: 不同土壤上盆栽水稻糙米中镉、铜、锌、镍和铬的平均含量分别为0.035ppm、4.82ppm、23.45ppm、1.09ppm和0.102ppm, 铅在糙米中未检出。

按自然地带划分, 不同土壤上生长的糙米中6种元素除铬外, 均以热带、亚热带湿润地区含量高。

不同土壤投加6种元素后种植水稻, 以有机质含量高, pH适中的土壤上水稻生长较好, 但各类土壤上生长的水稻均表现出受害症状。重金属在糙米中的累积随土壤pH升高而降低, 随土壤有机质含量增高而减少, 与土壤中<0.01毫米和<0.005毫米粒径含量呈负相关。

营养元素在土壤中的含量及其被农作物的吸收, 前人已开展了愈来愈多的研究, 土壤和粮食作物中重金属背景值的研究, 近年来也有较多的科学论文发表。我们的工作中曾发现我国不同地理环境中农作物的元素含量及其吸收规律有明显的地域性分异。本文主要通过野外调查和水稻盆栽试验, 研究我国12种土壤上水稻生长状况和在盆栽技术措施基本一致条件下, 水稻对镉、铜、锌、镍、铬和铅的摄取, 并进一步探讨水稻对重金属富集的影响因素。

一、样品的采集和研究方法

1981—1983年间, 对我国主要地带12个代表性土类进行了调查了解, 采集样品, 地点列于表1。这些土样都是选择在远离城市和工业污染源, 具有较好自然植被的典型地区, 土壤层次发育完整, 土壤名称及其环境特征和理化性状列表1、2。

水稻盆栽试验是在网室内进行, 使用高25厘米, 直径25厘米的白瓷盆, 内装表土10公斤, 每种土壤分别加入氯化镉、硫酸锌、硫酸铜、醋酸铅、碳酸镍、重铬酸钾等化合物, 加入的量以纯化学元素在土壤中的浓度计, 镉为3ppm, 铅、锌、铜、镍、铬各为50ppm。12种土壤分别设空白对照。6月中旬水稻插秧, 9月底收获。

土壤样品风干后, 磨碎分别过20目、100目和200目网筛, 供分析用。镉、铅用日本岛津643-13型石墨炉原子吸收仪测定, 锌、铜、镍用 y_2 型原子吸收仪测定。有机质含量用丘林法, pH用电极法, 机械组成用比重计法。

* 郑达贤、朱振源、李日邦、侯少范、王五一等同志参加样品的采集, 特此志谢。

本文于1985年8月15日收到。

表 1 土壤采样点的环境条件

Table 1 Environment conditions in soil sampling sites

土 类	采 样 地 点	自 然 地 带	成 土 母 质	地形部位、高程 (米)
砖红壤	广 东 海康加岭	热带湿润区	玄 武 岩	台 地 100
紫色土	四 川 大竹达县	亚热带湿润区	紫 色 砂 岩	残 丘 400
红 壤	湖 南 衡山树木园	亚热带湿润区	花 岗 岩	山脊中部 400
黄褐土	河 南 南阳卧龙岗	亚热带湿润区	第四纪红粘土	低山岗地 150
山地褐色土	陕 西 黄龙马蹄掌	暖温带半湿润区	黄 土	黄 土 梁 1,500
碳酸盐褐色土	北 京 香山樱桃沟	暖温带半湿润区	花岗岩凝灰岩	浅山坡地 200
栗钙土	内 蒙古 土木尔台	温带半干旱区	花 岗 岩	丘陵坡地 1,500
暗棕壤	吉 林 桦甸太平岭	温带半湿润区	流纹岩 凝灰岩	山脊上部 500
黑钙土	吉 林 白城平台	温带半湿润区	洪积冲积物	台 地 200
黑 土	黑龙江 北 安	温带半湿润区	冰水沉积物	倾斜冰水洪积平原 50
灰钙土	甘 肃 永昌茂茂岭	暖温带干旱区	洪积冲积物	冲积扇上部 2,100
灰漠土	新疆阜康	温带干旱区	洪积冲积物	冲积扇上部 600

表 2 土壤样品的理化性状

Table 2 The physico-chemical characteristics of soil samples

土 壤 类 型	pH	有 机 质 (%)	质 地	颗粒含量 (%)		SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
				(粒径毫米)				
				<0.01	<0.005			
砖 红 壤	4.75	6.35	粘 土	81.51	77.19	35.54	27.36	16.04
紫 色 土	4.30	2.50	细 砂 土	27.85	23.41	66.51	13.78	4.41
红 壤	4.45	5.31	粉 粘 土	50.56	41.90	60.97	19.35	4.38
黄 褐 土	7.13	5.31	粉 粘 土	52.50	44.23	64.23	17.76	5.26
山地褐色土	7.88	4.06	粉 壤 土	39.73	29.99	58.78	12.74	4.74
碳酸盐褐色土	7.50	3.50	粉 壤 土	—	26.21	—	11.72	3.53
栗 钙 土	7.60	3.03	砂 土	—	—	70.01	11.80	2.83
暗棕壤	5.45	13.09	粘 壤 土	46.79	38.89	57.90	12.38	4.55
黑 钙 土	7.60	5.21	细 砂 土	16.79	15.15	59.12	9.45	2.44
黑 土	5.25	10.67	粉 粘 土	61.53	58.72	58.63	13.91	4.50
灰 钙 土	7.90	4.31	粉 壤 土	32.43	23.40	36.99	12.40	4.86
灰 漠 土	8.58	1.25	粉 壤 土	33.43	30.36	60.00	12.32	4.14

二、结 果 与 讨 论

1. 我国12种土壤和水稻中重金属含量

12种表层土壤样品及其生长的水稻籽粒中6种重金属的含量由表3提供。可以看出,土壤中除砖红壤几种元素含量稍高外,其他各类土壤含量差异不大,平均含量都在世界土壤值范围内。表层与底层土壤元素含量比值大都小于1,说明均属于自然含量。

表 3 土壤和糙米中重金属含量 (ppm)

Table 3 The heavy metal content in cargo rice and Soil

土 类	元 素 项 目	Cd		Pb		Cu		Zn		Ni		Cr	
		土	米	土	米	土	米	土	米	土	米	土	米
砖红壤		0.39	—	13.3	未验出	96	4.63	134	24.5	146	0.75	50	0.16
紫色土		0.053	0.078	17.4	痕 量	21	4.50	86	23.5	58	1.63	65	0.073
红 壤		0.082	0.019	49.3	痕 量	21	4.20	86	27.3	31	0.55	70	0.09
黄褐土		0.727	0.028	31.5	未验出	30	5.00	74	19.5	47	1.63	100	0.08
山地褐色土		0.125	0.015	11.9	未验出	27	5.25	76	24.4	50	180	85	0.09
碳酸盐褐色土		0.07	0.005	22.5	未验出	24	5.25	66.9	27.5	33.8	0.88	73.6	0.09
栗钙土		0.04	0.008	33.9	未验出	14	2.40	38.0	24.2	28.0	0.20	102	0.06
暗棕壤		0.264	0.051	21.2	未验出	25	7.40	70.0	23.8	62.0	1.43	113.6	0.08
黑钙土		0.063	0.021	6.4	未验出	14	5.90	25.0	21.1	26.0	1.25	36.6	0.07
黑 土		0.040	0.045	12.9	未验出	24	5.00	75.0	23.0	35.0	108	91.0	0.07
灰钙土		0.031	—	11.5	未验出	31	—	73.0	—	88.0	—	103.0	—
灰漠土		0.139	0.08	8.6	未验出	25	3.43	62.0	19.1	38.0	0.75	74.0	0.27
平 均 值		0.168	0.035	20.03		29.33	4.82	72.9	23.5	53.6	1.09	80.57	0.102
标 准 差		0.206	0.028	12.60		21.65	1.29	25.1	2.72	34.2	0.51	23.18	0.060
变异系数 (%)		122.6	80.0	62.9		73.8	26.8	34.4	11.6	63.8	46.8	28.8	58.8

用12种土壤进行土培盆栽水稻,除灰钙土上水稻未结实外,其他各类土壤上水稻均完成生长周期,糙米对6种重金属除铅外都能吸收富集,镉、铜、锌、镍、铬的平均含量分别为0.035ppm、4.82ppm、23.45ppm、1.09ppm和0.102ppm。由于供试土壤的代表性和多样性,糙米中6种重金属平均含量,在确定水稻背景值时,是有参考价值的。

将12种土壤和水稻元素含量按自然地带的状况,划分为3个地区,列入表4,从中可以看出,土壤中重金属含量,地区性差异不明显,虽然元素含量和土壤发育程度有一定的关系,但土壤重金属含量主要受成土母质所控制,总量不随地带性变化而变化。水稻糙米对重金属的富集,除铬外,在湿润地区糙米重金属含量高,干旱地区含量低,水稻糙米对重金属的吸收累积反映出地区性差异,而和土壤重金属总量关系不显著,这主要决定于土壤中重金属可给态含量的高低,受土壤酸碱度等因素所制约。

表 4 不同地带土壤和糙米中重金属含量

Table 4 The heavy metal content in soil and cargo rice in various zone

地 区	Cd		Pb		Cu		Zn		Ni		Cr	
元 素	土	米	土	米	土	米	土	米	土	米	土	米
热带亚热带湿润区	0.097	0.083	20.88	痕 量	42.0	4.58	95.0	23.7	70.5	1.14	71.25	0.101
温带暖温带半湿润区	0.043	0.025	14.80	未验出	25.5	5.67	65.73	22.62	41.4	1.31	80.6	0.082
温带、暖温带干旱区	0.049	0.144	19.55	未验出	23.33	3.42	57.67	21.65	40.33	0.48	93.0	0.162

2. 不同土壤及水稻对投加重金属的反应

1) 重金属对水稻生长的影响 12 种土壤及投加重金属后水稻的生长发育状况绘于图 1, 可以看出, 不同土壤上水稻的生长发育是不同的, 其中以暗棕壤, 黄褐土和褐色土上的水稻生长较好, 灰漠土和砖红壤上的生长较差, 灰钙土上基本不能生长。水稻生长较好的土壤大多有机质含量多, 肥力较高, pH 也适中, 水稻生长较差的原因, 除与土壤 pH 过高过低有关外, 土壤质地过分粘重或太砂也可能是一个重要原因。在土壤中投加一定量的元素后, 水稻生长差异和自然土壤上的差异有相似的现象, 这说明, 混合投加低量重金属对水稻生长的影响, 小于不同土壤类型间水稻生长的差异。相同土壤比较, 加入污染元素后, 水稻均表现出受害症状, 生物量、株高和籽粒产量都有下降, 其中以红壤、紫色土、暗棕壤上生长的水稻受害症状明显, 黑土和黑钙土受影响较小, 这种现象说明不同土壤对重金属的容纳能力是不同的。

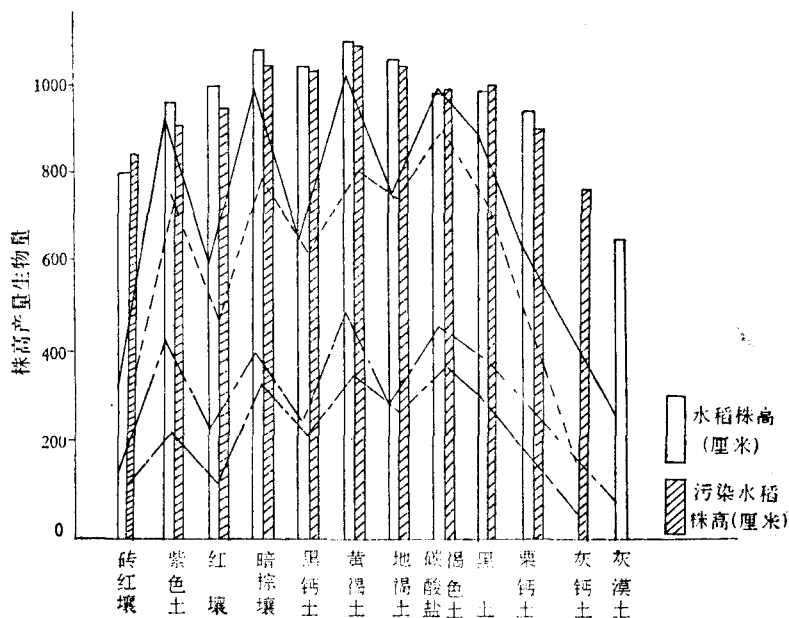


图 1 重金属对水稻生长的影响

Fig. 1 The influence of heavy metal on growth of rice

—水稻生物量 (克/盆) - - - 污染水稻生物量 (克/盆)
 ···水稻产量 (克/盆) - · - 污染水稻产量 (克/盆)

2) 水稻对重金属的吸收性能及其富集因素的分析 不同土壤混合投加低量的污染元素后, 水稻的吸收率是不相同的, 从表 5 可以看出, 热带、亚热带湿润区水稻对铜的吸收率较

表 5 糙米对投加元素的吸收率 (%)¹⁾

Table 5 Additive elements absorptivity by cargo rice

地 区	元 素	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr
热带亚热带湿润区		27.03	0	7.03	3.83	8.53	0.18
温带、暖温带半湿润区		9.43	1.0	2.61	12.85	7.79	0.32
温带、暖温带干旱区		46.4	0	1.42	6.6	9.60	0.03

$$1) \text{ 吸收率 } (\%) = \frac{\text{糙米元素含量} - \text{糙米背景含量}}{\text{投加元素量}} \times 100\%$$

高, 温带、暖温带干旱区水稻对镉和镍的吸收率高, 半湿润区水稻的吸收率普遍比较低, 总的看来单从地带分析, 很难找出分异的一致规律, 通过影响因素的相关分析, 显示出水稻对重金属的吸收与某些土壤基本性质有关: 由土壤 pH 和糙米中重金属含量的相关计算, 水稻对 Cu、Zn、Ni、Cr 的吸收与土壤 pH 的相关系数分别是 -0.54、-0.3、-0.74、-0.7, 其中有的呈显著相关, 有的相关性不显著, 但水稻吸收率有随土壤 pH 升高而降低的明显趋势, 这一结果与前人的结论是一致的 (C. N. Reddy, 1979; Sirha, 1978; McBride Blasick, 1979)。

土壤有机质含量的高低和水稻对重金属吸收之间的关系, 由图 2 表示, 可以看出, 水稻

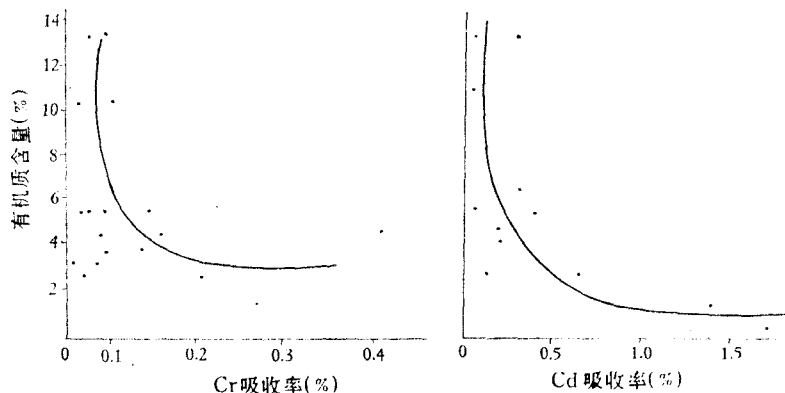


图 2 土壤有机质含量和水稻重金属吸收率的关系

Fig. 2 The relation of organic matter in soils with absorptivity of rice in heavy metal

对镉和铬的吸收随土壤有机质含量升高而降低, 水稻对铜、镍的吸收亦表现出一定的相似关系, 这可能是由于土壤中有机质与某些重金属结合为不易被植物吸收的配位络合物之故 (Ricardo等, 1975)。

土壤质地和水稻对重金属富集之间的关系, 根据供试的 12 个土壤, 按质地划分为粘质土和壤质土两大类, 其上生长的糙米镉、锌、铜、镍、铬的含量分别列入表 6, 此表说明, 无论是自然土壤, 抑或污染土壤, 水稻糙米的吸收率都是壤质土壤较粘质土壤大。若按土壤机

械组成中 <0.01 毫米和 <0.05 毫米粒径的土粒含量与水稻籽粒的吸收率进行相关计算,自然土壤上水稻铜、锌、镍的吸收率与土壤中 <0.01 毫米和 <0.005 毫米粒径的土粒呈显著相关(表7)。投加元素的土壤上水稻铜的吸收与土壤中 <0.01 毫米和 <0.05 毫米粒径含量也呈显著相关,其他元素虽然相关关系达不到显著水平,但仅呈负相关。

表6 水稻糙米吸收率(%)

Table 6 Absorbivity of cargo rice

土壤	质地	Cd	Zn	Cu	Ni	Cr
自然土壤	粘土	15.4	28.5	18.6	2.2	0.13
土壤	壤土	20.8	43.6	27.0	3.0	0.13
投加元素土壤	粘土	7.6	20.1	8.8	4.1	0.12
土壤	壤土	14.0	26.8	12.2	6.3	0.14

从以上相关关系分析中可以看出,土壤的pH固然是影响不同土壤上生长的水稻吸收重金属元素的一个重要的因素,但不可忽视土壤机械组成对水稻吸收性能的影响,例如在同一自然地带中土壤过砂或过粘,机械组成的作用就会超过pH的影响,

pH较高的砂性土上生长的水稻,对重金属的吸收反而会显著的高于pH较低的粘重土壤。本文所列的某些南方酸性土壤的水稻吸收率小于某些北方土壤,其主要原因就在于土壤机械组成粘重的缘故,同时,受地带性因素,土壤pH值的影响,水稻对重金属元素的富集,显示出一定的地带性分异趋势。土壤质地和有机质含量,也影响到水稻对重金属的吸收和富集。

表7 水稻糙米对重金属的吸收与土壤粘粒的相关系数

Table 7 The correlation coefficient of the heavy metal absorbivity of cargo rice and clay particle fraction in soil

元素	粒径 土壤	<0.01 毫米		<0.005 毫米	
		自然土壤	投加元素土壤	自然土壤	投加元素土壤
Cd		-0.526	-0.250	-0.367	-0.340
Zn		-0.705*	-0.540	-0.650*	-0.650*
Cu		-0.707*	-0.752*	-0.678*	-0.677*
Ni		-0.688	-0.501	-0.693*	-0.533
Cr		-0.533	-0.508	-0.431	-0.433

* 0.05水平显著

参考文献

- 中国科学院土壤背景协作组 1979 北京、南京地区土壤若干元素的自然背景值。土壤学报 16(4):319—327。
 ———— 1982 环境中若干元素的自然背景值及其研究方法。科学出版社。第110—114页。
 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会 1985 中国自然地理总论。科学出版社,第187—196页。
 袁可能 1983 植物营养元素的土壤化学。科学出版社。第422—540页。
 夏增禄、穆从如等 1983 北京东郊作物对重金属的吸收及其与重金属在土壤中含量和存在形态的关系。生态学报 3(3):277—287。
 穆从如等 1986 农田生态系统中重金属的积累和循环。地理研究 5(3):76—81。
 Lisk, D. 1972 Trace metals in soils, plants and animals. *Adv. Agron.* 24:267—325。

CONTENTS OF HEAVY METALS AND THEIR ENRICHMENT FACTORS IN RICE

Mu Chongru Xia Zengiu Li Senzhao

Meng Weiqi Shen Ruizhen He Ruizhen

(Institute of Geography, Academia Sinica, Beijing)

Twelve types of soil of China are dealt with, and the results of experiment on potted rice made by authors are discussed in this paper.

Contents of Cd, Cu, Zn, Ni and Cr in the potted rice growing in twelve types of soil of China are 0.035ppm, 4.82ppm, 23.45ppm, 1.09ppm and 0.102ppm respectively. Pb is not surveyed in experiment.

Except Cr element, natural contents of six kinds of heavy metals in growing rice are very high in the tropical and subtropical wet zones. Added the six kinds of heavy metals to soil, it is showed that growing rice suffers harm. When soil contains high organic matter and proper pH value, rice grows much better.

Uptake of heavy metal by organs of rice decreases with the increase in pH value and organic matter of soil. Decrease in heavy metal uptake is a negative correlation with the contents of soil grain of $<0.01\text{mm}$ and $<0.005\text{mm}$ diameter.